

METODOLOGÍA PARA EL APRENDIZAJE DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS
POR MEDIO DE UNA INYECTORA VIRTUAL

JORGE IVÁN VILLEGAS CARDONA

UNIVERSIDAD EAFIT
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MEDELLÍN, COLOMBIA
2015

METODOLOGÍA PARA EL APRENDIZAJE DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS
POR MEDIO DE UNA INYECTORA VIRTUAL

TRABAJO DE PROFUNDIZACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:
MAGISTER EN INGENIERÍA MECÁNICA

ASESOR:
ING. MSC. CARLOS ARTURO RODRÍGUEZ ARROYAVE

UNIVERSIDAD EAFIT
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MEDELLÍN, COLOMBIA
2015

TABLA DE CONTENIDO

1.	OBJETIVOS	6
1.1.	OBJETIVO GENERAL	6
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
2.	INTRODUCCION	7
3.	ANTECEDENTES	8
4.	METODOLOGIA	14
5.	FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA.....	17
5.1.	Movimientos de los componentes mecánicos de la máquina inyectora:...	17
5.2.	Calentamiento del aceite.	18
5.3.	Calentamiento de la resistencia y de la masa:.....	18
5.4.	Comportamiento de la velocidad, presión y temperatura en la inyección: 19	
5.5.	Balance térmico en el molde durante el enfriamiento	22
5.6.	Fuerza de cierre.....	23
6.	DESCRIPCIÓN DE LA INYECTORA VIRTUAL.....	24
6.1.	Módulo de máquina.	24
6.2.	Módulo de carga.	26
6.3.	Módulo de enfriamiento.	27
6.4.	Módulo de avanzado.....	28
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	30
8.	CONCLUSIONES	34
9.	TRABAJO FUTURO.....	36
10.	BIBLIOGRAFÍA	37
11.	ANEXOS	40
11.1.	Descripción general de la herramienta:	40
11.2.	Módulos de la herramienta:	41
11.3.	Procedimiento para implementar una nueva inyectora:	57

TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1 - Izquierda: PICAT II, Derecha SIMTECH.....	11
Figura 2. Diagrama de lazo cerrado para simulación de movimiento de molde....	18
Figura 3. – Diagrama lazo cerrado movimiento de molde.....	19
Figura 4 - Intercambio de calor en el molde.....	22
Figura 5 - Pseudo código balance de calor en molde	23
Figura 6 - Molde de probetas.....	31
Figura 7 - Presión de inyección y velocidad de inyección.....	33
Figura 8 - Masa vs tiempo de pospresión	33
Figura 9 – Archivo ejecutable.....	40
Figura 10 – Pantalla de inicio.....	41
Figura 11 – Pantalla principal del módulo máquinas.....	42
Figura 12 – Distribuidor de aguas.....	43
Figura 13 – Alarma de la máquina.....	44
Figura 14 – Puerta del operador	44
Figura 15 – Pantalla principal módulo de máquina	45
Figura 16 – Estimación del peso.....	46
Figura 17 – Parámetros de carga	47
Figura 18 - Sobreinyección	47
Figura 19 – Parámetros de carga corregidos.....	47
Figura 20 – Simulación del llenado incompleto.....	48
Figura 21 – Pantalla principal del módulo de refrigeración	49
Figura 22 – Selección del material.....	50
Figura 23 – Parámetros de enfriamiento.....	50
Figura 24 – Visor de defectos	51
Figura 25 – Parámetros de refrigeración corregidos.....	51
Figura 26 – Diales de temperatura.....	52
Figura 27 – Pantalla principal módulo de temperatura.....	52
Figura 28 – Selección de materiales.....	54
Figura 29 – Parámetros de la geometría	54
Figura 30 – Parámetros del ciclo	55
Figura 31 – Husillo de inyección	55
Figura 32 – Posición del husillo	56
Figura 33 – Visor e defectos	56
Figura 34 – Artículo sin defectos.....	57
Figura 35 - Geometría 3d de la inyectora	57
Figura 36 - (Arriba) Tornillo Solidworks. (Abajo) Tornillo Blender	58

Figura 37 - Ambas inyectoras posicionadas en escena	59
Figura 38 - Máquinas de estados finitos	60
Figura 39 - Configuración de máquinas de estado finito	61
Figura 40 - Ubicación del código matemático	61
Figura 41 - Resultado final	62

1. OBJETIVOS

1.1.OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para el aprendizaje de inyección de polímeros por medio de una inyectora virtual.

1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.2.1. Identificar los módulos a desarrollar dentro de la herramienta virtual
- 1.2.2. Modelar los fenómenos de transportes asociados al proceso de inyección.
- 1.2.3. Desarrollar los módulos de aprendizaje con diferentes niveles de complejidad.
- 1.2.4. Comparar los resultados obtenidos con la herramienta con los resultados obtenidos en una inyectora real.

2. INTRODUCCION

El objetivo del proceso de inyección es transformar un material polimérico en un artículo con una forma y especificaciones definidas. Para lograr este objetivo, deben estar en correcta armonía los siguientes tres elementos: Máquina, molde y materia prima. El éxito del proceso depende principalmente de un correcto diseño de molde, una adecuada selección de material y tipo de máquina inyectora y de la acertada parametrización del proceso.

Debido al gran número de parámetros involucrados en el proceso de inyección, durante el proceso de aprendizaje se hace indispensable complementar la clase teórica con una componente práctica, en donde el estudiante tenga un contacto directo con la máquina y pueda observar la evolución del proceso. Sin embargo, la máquina inyectora y el molde son componentes delicados, y su mala manipulación puede generar daños cuantiosos; por esto, es común que durante el proceso de aprendizaje el estudiante no pueda tener una interacción directa con la máquina, sino que se limite a ser un espectador del proceso.

Este proyecto desarrolla una metodología que apoya el aprendizaje del proceso de inyección de polímeros, el cual es acompañado por una máquina virtual con la que los estudiantes pueden interactuar. Esta máquina se presenta como una alternativa para ampliar la gama de recursos de los que dispone el estudiante durante su proceso de aprendizaje. La inyectora seleccionada para la construcción de esta herramienta virtual es una máquina con una distancia entre barras de 420mm y una fuerza de cierre máxima de 100Ton. Esta inyectora fue modelada con base en una de las inyectoras a las que los estudiantes de la Universidad EAFIT tienen acceso para realizar sus prácticas y cuenta con un panel de control virtual similar.

Esta herramienta virtual permite a los estudiantes familiarizarse con la interface y la funcionalidad propias de esta máquina, y les posibilita realizar prácticas no presenciales donde se puede evaluar la bondad de los parámetros de transformación elegidos para el proceso. Además, esta máquina produce piezas virtuales inyectadas que muestran un nivel de defectos asociado a los valores de los parámetros seleccionados por el estudiante, parámetros que pueden ser modificados hasta obtener una pieza con las características deseadas.

Es necesario aclarar que aunque esta herramienta es de tipo didáctico, está desarrollada con base en ecuaciones de fenómenos de transporte que permiten predecir de forma aproximada el comportamiento de las variables de salida.

3. ANTECEDENTES

Los procesos productivos tienen la característica de ser influenciados por una cantidad indefinida de variables y la combinación de todas estas determina la rentabilidad del proceso. Un proceso productivo mal definido o parametrizado puede generar pérdidas para una compañía. Igual ocurre con el proceso de inyección de polímeros, y es por esta razón que los ingenieros han investigado desde hace 3 décadas las diferentes formas de optimización [1], buscando mejorar la productividad y por ende la rentabilidad del proceso.

Los estudios de optimización no se han limitado a los parámetros de inyección como la velocidad, presión o temperatura, para mejorar las características del artículo; sino que también han estudiado como optimizar las variables mencionadas para disminuir el consumo de energía [2].

Un proceso se puede optimizar de diferentes maneras, una de ellas es mediante la ayuda de herramientas estadísticas, las cuales no requieren un conocimiento muy profundo del proceso. Diferentes estudios surgen en este campo buscando optimizar las interacciones entre las variables, como es el caso de la metodología de Taguchi [3], o el método SIMPLEX [4]. Hasta metodologías más complejas como la optimización por redes neuronales, las cuales permiten, por medio de una serie de experimentos, encontrar un ajuste óptimo que maximice la productividad [5, 6].

Además de los modelos estadísticos, otra forma de optimizar un proceso es mediante la modelación numérica del fenómeno. Los primeros modelos del fenómeno de inyección corresponden a los estudios realizados en la década de los años 50 por Spencer y Gillmore, en donde usan una ecuación empírica para describir el flujo del polímero a través de un capilar y obtener resultados como tiempos de llenado y pérdidas de presión a lo largo de la longitud [7].

Estos modelos fueron evolucionando hasta modelos en 2-dimensiones, describiendo el flujo en una placa plana aplicando la ecuación de Hele-Shaw, por medio de simulaciones por elementos finitos o diferencias finitas [8]. La base de este modelo consiste en subdividir el espesor de la pieza en diferentes capas e interpolar los resultados en el espesor. Para espesores delgados el error de este método no es representativo. Sin embargo, para grandes espesores (mayores a 4mm) el error se incrementa considerablemente.

Para poder describir los fenómenos de inyección de manera aproximada, se requiere que una gran cantidad de ecuaciones sean resueltas simultáneamente. Por esta razón, con el aumento en la capacidad de cómputo, los modelos numéricos han podido evolucionar a estudios tridimensionales del fenómeno, mejorando así la predicción de los resultados [9].

La masificación de los equipos de cómputo, posibilitó el desarrollo de herramientas computacionales que facilitaran a la industria trabajar en la optimización de sus procesos productivos y fue por esta razón que autores como D. Cowan [10] y R. Doyle y K. Case [11] empezaron a fomentar el apoyo a las universidades para la creación de herramientas CAE (Computer Assisted Engineering), permitiéndole a la industria destinar sus recursos al uso de estas herramientas y no a su creación. Empresas como Chrysler identificaron las ventajas del uso de estas herramientas y empezaron a implementarlas en su día a día [12] y su uso se extendió hasta tal punto que actualmente son pocas las empresas que trabajan sin una herramienta CAE para optimizar sus procesos.

El proceso de inyección también se ha beneficiado del desarrollo de herramientas computacionales. Al principio fueron cuestionadas debido a la complejidad del comportamiento de los materiales poliméricos [13], pero a medida que se fueron refinando los modelos y aumentando la capacidad de cómputo de los equipos, fue posible desarrollar programas CAE aplicados a la inyección de polímeros, con resultados satisfactorios.

Los programas CAE se pueden dividir en dos grandes frentes. El primero son aquellos programas desarrollados por las universidades para empresas con fines específicos. Estos tienen la ventaja de que son personalizados para un tipo de empresa en particular y sus necesidades, pero tienen la desventaja de que el público general no puede acceder a ellos y el conocimiento se queda entre la persona que desarrolla la herramienta y la empresa beneficiada.

Otro frente de los programas CAE son aquellos que son de carácter comercial. En este caso, son grandes empresas las que utilizan recursos como universidades e investigadores para desarrollar herramientas destinadas a abordar tareas que son comunes para diferentes tipos de industrias. Este tipo de Software se ha especializado principalmente en la simulación de moldes de inyección, convirtiéndose en una gran ayuda para las empresas que diseñan piezas plásticas y evitándoles costosos reprocesos asociados a la modificación de moldes de inyección. Los programas que dominan el mercado hoy en día son Moldflow® [14], MOLDEX3D® [15] y SIGMASOFT [16] entre otros.

Estos programas comerciales de simulación tienen altos costos de inversión, mantenimiento e implementación. Además, no deben ser considerados como herramientas de carácter didáctico, debido a que para su utilización el usuario debe contar con un conocimiento avanzado en materiales y procesamiento de plásticos y su interface está diseñada para seguir una metodología establecida por el fabricante. Adicionalmente, es necesario resaltar que la calidad y la precisión de los resultados obtenidos dependen directamente de la calidad de la información ingresada por el usuario.

Los ambientes virtuales juegan un papel importante en la educación de los estudiantes [17]. Mediante la representación virtual de los resultados, los estudiantes pueden entender mejor lo que está sucediendo y la relación de las variables. En muchos campos ha estado creciendo el uso de herramientas virtuales, como el médico con herramientas para el apoyo en cirugías [18] [19], entrenadores para militares [20], laboratorios [21] y ambientes virtuales para el entrenamiento de máquinas de manufactura [22] [23].

Las herramientas dedicadas para la enseñanza del proceso de inyección abundan en internet. Son herramientas básicas que ayudan en los cálculos para parametrizar y optimizar el proceso. Pero estas herramientas en general, no cuentan con una interfaz gráfica que ayuden al estudiante a entender que está sucediendo en el proceso, ni a relacionar los valores seleccionados para los parámetros de entrada, con las salidas obtenidas. Empresas como Tooling U-SME [24], Routsis Training [25], cuentan con cursos esenciales del proceso de inyección, apoyados en materiales como videos, imágenes y animaciones en 3D. Pero no cuentan con una herramienta virtual interactiva, que permita al estudiante validar lo aprendido.

Actualmente existen dos programas comerciales utilizados para la capacitación de personal técnico en el proceso de inyección que son PICAT II ® [26] y SIMTECH ® [27]. Estos son programas completos que simulan detalles de la máquina inyectora, pero son complejos si la persona no ha tenido contacto o experiencia directa con una de ellas. Ambos presentan un ambiente virtual, en el que el estudiante puede interactuar con las variables del proceso y poder observar las relaciones entre las mismas. Ambos programas utilizan un modelo 3D simple o esquemático para representar la máquina inyectora (Figura 1). El objetivo de estos simuladores es capacitar a los operadores de máquinas para que tengan una mejor comprensión del proceso. Ambos programas tienen un grado de complejidad alto, y parten del hecho que la persona que se enfrenta a la herramienta virtual ya pasó por los diferentes módulos ofrecidos por ellos o es una persona que es familiar con el proceso de inyección.

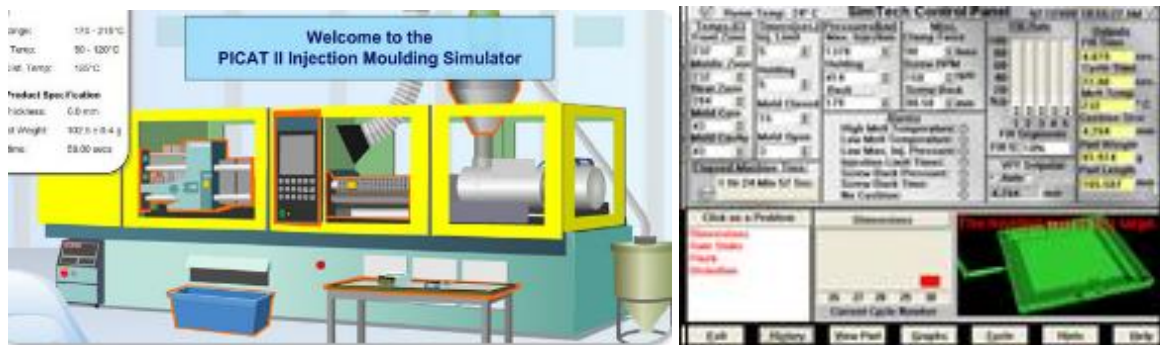


Figura 1 - Izquierda: PICAT II, Derecha SIMTECH

Compañías manufactureras de máquinas inyectoras como Krauss Maffei [28] , han desarrollado herramientas en ambientes virtuales que permiten a sus clientes, entrenar a los operadores en la manipulación de las máquinas inyectoras. Estos simuladores se enfocan en la manipulación y entendimiento de la máquina inyectora, mas no en los fundamentos del proceso. Estas herramientas son de distribución controlada y de alto costo, además de tener un grado de dificultad muy alto en el uso, pues simulan completamente el control de la inyectora.

Trabajos por grupos de investigación han desarrollado ambientes virtuales para el aprendizaje del proceso de inyección. Sun y Tsai [29] desarrollaron una plataforma virtual para el aprendizaje del proceso. La inyectora presentada tiene un alto nivel de detalle en la parte mecánica, y apoyado por una interfaz de realidad virtual, le permite al usuario tener un mejor entendimiento del funcionamiento mecánico de la máquina. Bin, et al [30] desarrollaron una herramienta de entrenamiento basado en realidad virtual y redes de Petri. Las redes de Petri son usadas para la simulación mecánica de la inyectora, y usan un modelo básico de Elementos finitos para describir el proceso de llenado. La interfaz gráfica con el usuario se hace mediante una inyectora bidimensional esquemática. Martinez, et al. [31] Proponen una inyectora virtual para el aprendizaje. Esta herramienta le permite al usuario definir los parámetros y los compara con los parámetros óptimos del proceso. Le presenta al usuario una serie de moldes predefinidos para su selección. La interfaz gráfica consta de un panel de control, similar al de una inyectora y una representación de la pieza a inyectar.

Los cursos de inyección universitarios, tradicionalmente han tenido la metodología de enseñanza catedrática, en donde se le da al estudiante una base teórica y se espera que él entienda qué sucede con los cálculos que está realizando y normalmente se acompaña de una parte práctica de baja intensidad donde el

estudiante observa a un operario utilizar la inyectora. En este trabajo se pretende entregar una herramienta virtual que acompañe todo el aprendizaje del estudiante durante las diferentes temáticas o alcance del curso, generando prácticas predefinidas para que el estudiante tenga un primer acercamiento virtual con la inyectora. A diferencia de las herramientas presentadas en el estado del arte, esta herramienta cuenta con una interfaz con el usuario de calidad fotorrealista, que facilita al estudiante entender y ubicarse mejor, una inyectora y un molde de características técnicas similares a las que se enfrentarán en los laboratorios prácticos. Además cuenta con un modelo matemático para describir los movimientos de los componentes, y otro modelo matemático basado en fenómenos de transporte para la predicción de los resultados.

Para lograr una representación creíble del proceso y de la máquina, Liu Ying [32] plantea una metodología para el modelado eficiente y rápido de una máquina inyectora, que da como resultado una representación real que mejora el grado de inmersión y podría capturar de manera más efectiva la atención del estudiante [17].

La representación gráfica de un modelo en 3D, puede ser presentada al usuario de diferentes maneras, mediante una imagen estática, una animación o un ambiente virtual. Las imágenes o animaciones tienen la desventaja que solo muestran información predefinida y no hay grado de interacción entre el usuario y el objeto. Un ambiente virtual tiene la ventaja que le permite al usuario interactuar con el objeto y observar lo que es de interés para el mismo.

La herramienta para poder crear un ambiente virtual en donde el usuario pueda interactuar con los objetos 3D, se llama motor gráfico. Un motor gráfico genera un ambiente o interfaz en donde los objetos 3D pueden reaccionar a las ecuaciones físicas o ecuaciones matemáticas definidas por el creador o el usuario.

Los motores gráficos fueron creados inicialmente para los videojuegos. Un videojuego es una aplicación donde el usuario interactúa con objetos para lograr un objetivo. Las universidades e investigadores toman este principio y lo utilizan para crear herramientas virtuales de aprendizaje que mejoran el grado de comprensión comparado con la lectura de un libro. La ventaja de los motores gráficos de videojuegos es que evolucionan para ser más realistas y hacer que el usuario tenga una experiencia más inmersiva. Dentro de los más comunes de libre acceso se encuentran CRYENGINE® [33], UNREAL® [34] y UNITY® [35].

Para este trabajo se selecciona la herramienta UNITY®, Debido a su facilidad de uso, flexibilidad en la programación, y amplia gama de plataformas en las cuales puede trabajar. UNITY® permite generar aplicaciones tanto para Windows, como para Mac, Internet, tabletas, celulares y consolas de video juegos. Esto permitiría al estudiante llevar su simulador a la inyectora real y validar en tiempo real los resultados de la práctica del curso. El lenguaje de programación de UNITY®, es por medio de máquinas de estado finito, que simplifica la programación del funcionamiento de la máquina inyectora. La programación de las ecuaciones matemáticas se realiza con lenguaje JAVA, que se integra con UNITY®. EL modo de licenciamiento permite la creación de herramientas para la educación sin ningún costo, desde que la aplicación creada mediante este motor no genere ganancias debido a la venta del mismo.

EL motor utiliza varias técnicas que mejoran la representación gráfica, dándole un aspecto fotorrealista a los ambientes virtuales, un aspecto muy importante en los videojuegos, pero toma mucha más fuerza en los simuladores o entrenadores virtuales. UNITY® no solo ha sido usado para crear videojuegos, se han creado aplicaciones virtuales como [35]:

- Visualizadores arquitectónicos para mostrar proyectos a clientes
- Simuladores o Showrooms de vehículos nuevos, donde el usuario puede entrar y ver el vehículo que desea comprar, ver sus colores, y agendar la cita con el asesor o hacer su compra.
- Simuladores para el uso de maquinaria pesada.
- Simuladores para procedimientos quirúrgicos.
- Simulador del control de un submarino.
- Proyectos de arte
- Proyectos de realidad virtual.

Este motor gráfico no ha sido usado para la representación virtual de una máquina inyectora y/o molde de inyección, y tampoco para el entrenamiento en el proceso de inyección.

4. METODOLOGIA

La finalidad de este proyecto es proponer una metodología para el aprendizaje de inyección de polímeros por medio de una inyectora virtual. Esta metodología está dividida en 8 módulos teórico-prácticos, los cuales combinan clases magistrales, prácticas virtuales y prácticas de laboratorio.

A continuación se presenta una descripción simplificada de los módulos propuestos como parte de esta metodología:

Inyección de polímeros: Este primer módulo ofrece una introducción al proceso de inyección, a los artículos que se pueden manufacturar con el proceso, y a las tendencias actuales.

Introducción a los materiales plásticos: El segundo módulo presenta una introducción a los materiales plásticos. Se presentan las propiedades mecánicas, térmicas y reológicas y la importancia de las mismas en el proceso de inyección.

Introducción a la máquina inyectora: Este módulo hace una introducción a la máquina inyectora, a su clasificación y sus partes funcionales. Se propone complementar el proceso de aprendizaje con el módulo de máquina de la herramienta virtual desarrollada como parte de este proyecto, para que el estudiante explore en tiempo real la máquina y experimente sus funciones básicas y sus limitaciones. La siguiente parte es realizar un laboratorio con una inyectora real, en donde el estudiante podrá validar los ejercicios aprendidos con el simulador.

Descripción básica del ciclo de inyección: este módulo presenta al estudiante los fundamentos del ciclo de inyección. Se inicia con clases magistrales explicando los diferentes pasos del ciclo de inyección y se complementa con el módulo de máquina de la herramienta virtual. En cada paso del ciclo de inyección hay un movimiento de la máquina y la inyectora virtual desarrollada permite observarlos y analizarlos.

Variables de plastificación: Luego de tener claro los fundamentos del ciclo e inyección, se procede a explicar las diferentes variables involucradas en la plastificación del polímero. Se explica cómo calcular la cantidad de carga necesaria para inyectar un artículo plástico, calcular el punto de conmutación y las consecuencias de una mala parametrización. Usando como apoyo el módulo de plastificación de la herramienta virtual, se muestra a los estudiantes como se calculan las variables de plastificación. Además, esta herramienta le permite al

estudiante realizar su propia parametrización y experimentar las consecuencias de una mala configuración.

Variables de enfriamiento: Este módulo ofrece una introducción a las diferentes variables involucradas en el proceso de enfriamiento, tales como la temperatura de masa, de refrigerante y de molde, así como el caudal del refrigerante. Con apoyo del módulo de enfriamiento de la herramienta virtual, se muestra a los estudiantes como las variables afectan tanto la calidad del artículo como el rendimiento del proceso.

Taller de ciclo de inyección: Como parte de este módulo, se presenta a los estudiantes diferentes casos de estudio, los cuales deben ser analizados y parametrizados de manera autónoma. Esta parametrización es apoyada por el módulo avanzado de la inyectora virtual, permitiendo a los estudiantes configurar todas las variables vistas anteriormente y experimentar los efectos de cada una de ellas en el producto final y en el mismo proceso.

Defectos en el ciclo de inyección: Primero en la clase magistral se exponen los diferentes defectos que se pueden obtener en el proceso de inyección, sus posibles causas y sus diferentes formas de solución. Posteriormente, se pueden simular los defectos usando el módulo avanzado de la herramienta virtual, esto le permite al estudiante interactuar con la máquina e intentar diagnosticar y solucionar de manera autónoma los defectos obtenidos, sin el temor a realizar un daño en una inyectora real. Finalmente se pasa a la práctica de laboratorio y se muestra a los estudiantes los diferentes defectos obtenidos en el proceso real.

	Temas	Herramientas
Inyección de polímeros	Introducción al proceso de inyección Tendencias en el proceso de inyección	Videos Bibliografía
Introducción a los materiales plásticos	Introducción a los materiales poliméricos Propiedades mecánicas Propiedades térmicas Propiedades reológicas	Bibliografía
Introducción a la máquina inyectora	Componentes funcionales de la máquina inyectora Movimientos de la máquina Restricciones de la máquina Tomillo de inyección (geometría y función)	Bibliografía Módulo máquina inyectora
Descripción básica del ciclo de inyección	Ciclo de inyección y las actividades que lo componen	Bibliografía Módulo máquina inyectora
Variables de plastificación	Longitud de plastificación Llenado volumétrico Punto de conmutación Contrapresión Descompresión	Bibliografía Módulo plastificación
Variables de enfriamiento	Tiempo de enfriamiento Refrigeración en el molde Flujo y temperatura del refrigerante del molde Temperatura de la masa	Bibliografía Módulo refrigeración
Taller ciclo de inyección	Parametrización del proceso Diferentes geometrías	Bibliografía Módulo avanzado
Defectos en el proceso de inyección	Defectos en el proceso de inyección y sus posibles causas y soluciones	Bibliografía Módulo avanzado

Se aconseja que estos módulos sean seguidos de acuerdo al orden propuesto en esta metodología, debido a que los conocimientos de cada módulo se requieren para el siguiente y en caso de omitir alguno, el estudiante no contará con las bases o fundamentos suficientes para lograr un adecuado entendimiento del proceso de inyección de polímeros.

5. FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA

Para el desarrollo de esta herramienta virtual fue necesario modelar los siguientes fenómenos del proceso de inyección:

- Movimientos de los elementos de la máquina inyectora.
- Calentamiento del aceite de la máquina.
- Calentamiento de la resistencia y de la masa.
- Comportamiento de la velocidad y presión en la inyección.
- Balance térmico en el molde durante el enfriamiento y la inyección.
- Enfriamiento del artículo durante la inyección y el enfriamiento.
- Fuerza de cierre

5.1. Movimientos de los componentes mecánicos de la máquina inyectora:

Para poner un cuerpo estático en movimiento se requiere una fuerza definida, esta fuerza genera una aceleración que se describe por la(1). Para poder abrir y cerrar un molde en una máquina inyectora, se debe generar una fuerza en el sistema hidráulico o eléctrico. El cierre y apertura de molde es un proceso en el cual, tanto la velocidad como la fuerza son variables de entrada o definidos por el usuario. La fuerza configurada en la máquina se conoce como fuerza disponible, y es la fuerza de la cual la máquina dispone para poder acelerar y mover el molde. Si se configura una fuerza muy baja, entonces la máquina no tendrá a su disposición la fuerza necesaria para moverlo a la velocidad deseada.

$$F = m * a \quad (1)$$

El motor gráfico usado en esta herramienta, cuenta con un motor físico que calcula mediante física básica el movimiento de los cuerpos rígidos. Para simular el fenómeno de movimiento, se programa un control en lazo cerrado mostrado en la Figura 2, el cual aplica una fuerza al molde, y evalúa en tiempo real la velocidad resultante del molde. Con esta retroalimentación se aplica una fuerza positiva o negativa para mantener una velocidad constante que es definida por el usuario. Si se llega a la fuerza disponible máxima, entonces se deja este valor constante y la velocidad no se aumentará.

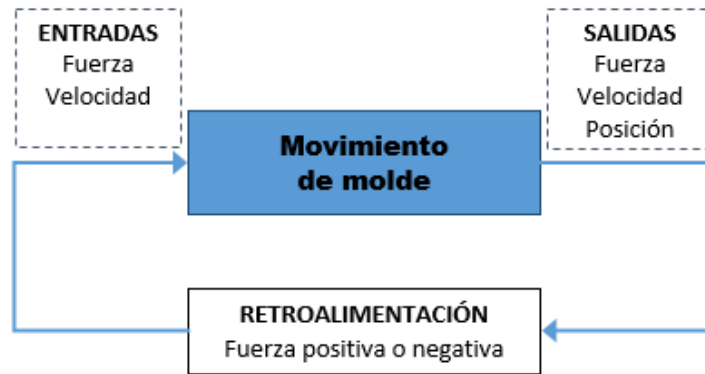


Figura 2. Diagrama de lazo cerrado para simulación de movimiento de molde

5.2. Calentamiento del aceite.

Para este fenómeno se decide utilizar modelos simplificados de transferencia de calor, pues el objetivo de esta herramienta no es mostrar el detalle del fenómeno del calentamiento del aceite, sino mostrar un comportamiento aproximado o una tendencia.

Para simular este fenómeno, se asume el tanque de aceite como un cuerpo sólido único homogéneo y no se tiene en cuenta el fenómeno de pérdida de calor del tanque al medio ambiente, ni las pérdidas de calor en las tuberías. Se asume que la temperatura es constante en todo el interior del tanque de aceite, lo que simplifica el modelo matemático, permitiendo el uso de la ecuación de. Enfriamiento de Newton tanto para enfriamiento, como para simular un calentamiento (2)

$$T(t) = T_0 + \Delta * e^{-kt} \quad (2)$$

En el tanque solo se tiene en cuenta la generación o entrada de calor al sistema debido a la fricción del aceite al fluir por el sistema y la salida de calor debido al sistema de refrigeración. Se programa un control en lazo cerrado el cual activa el sistema de refrigeración del aceite cuando la temperatura se empieza a elevar.

5.3. Calentamiento de la resistencia y de la masa:

En una máquina inyectora, en el cilindro de plastificación se tiene de 3 a 8 resistencias de calefacción dependiendo del tipo de inyectora. Estas resistencias son las que proveen el calor necesario para fundir el polímero y poder iniciar el

proceso de inyección. El objetivo de esta herramienta es mostrarle al estudiante cómo reacciona la máquina cuando se intenta mover el husillo cuando el polímero está frío.

No se simula el efecto de calentamiento durante la plastificación, sino que se asume que la temperatura es constante a través de todo el cilindro. Estas suposiciones permiten simplificar el modelo de calentamiento y usar la ecuación (2). El calor de entrada es aportado por conducción a través de una resistencia y la salida de calor es a través de pérdida de calor al ambiente por convección

5.4. Comportamiento de la velocidad, presión y temperatura en la inyección:

Este fenómeno es el más complejo de describir en la inyección de polímeros. En esta herramienta se realiza una serie de suposiciones para simplificar las ecuaciones y permitir que se pueda observar el fenómeno en tiempo real.

El primer fenómeno a simular es el movimiento del husillo. Usando el mismo control en lazo cerrado del movimiento del molde, se programa el movimiento del tornillo Figura 3. El proceso de inyección está dividido en 2 etapas, el llenado volumétrico y el llenado gravimétrico. El llenado volumétrico es un proceso en donde se define una velocidad del husillo, y la inyectora dispone de una fuerza para lograr esta velocidad definida.

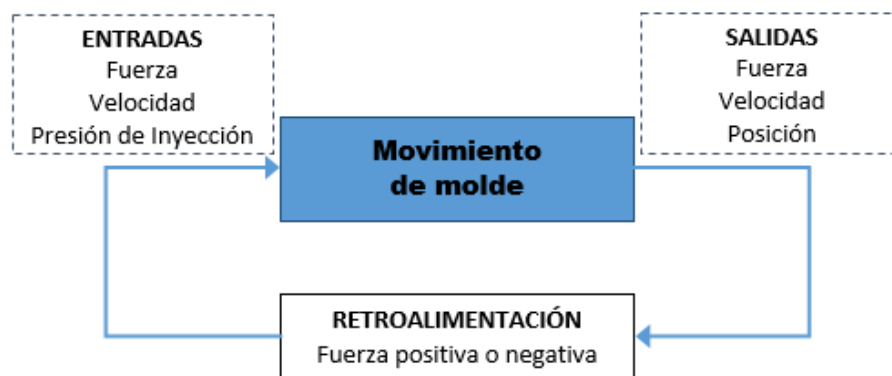


Figura 3. – Diagrama lazo cerrado movimiento de molde

Este modelo de movimiento tiene una consideración adicional a tener en cuenta. A medida que el husillo se desplaza, este debe hacer fluir el polímero a través de los canales de alimentación y la cavidad. La presión necesaria para hacer fluir el

polímero no es constante, varía con el desplazamiento y esta presión debe ser tomada en cuenta para modelar el movimiento del husillo.

Para encontrar la presión necesaria para desplazar una cantidad definida del material al molde, se parte de la ecuación de momentum (3) y Navier-Stokes (4):

$$\rho \frac{D}{Dt} \bar{v} = -\bar{\nabla} p + \mu \nabla^2 \bar{v} + \rho \bar{g} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho U_z)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Se establecen las siguientes suposiciones:

- Flujo unidireccional
- Flujo incompresible
- Flujo laminar (esta suposición se puede hacer debido a las altas viscosidades del polímero)
- Flujo completamente desarrollado
- Adherencia en las paredes, que permite simplificar las condiciones de frontera
- Efectos gravitacionales despreciables

Estas suposiciones permiten simplificar la ecuación como se muestra en (5)

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \right] \quad (5)$$

Los polímeros no son fluidos Newtonianos, su viscosidad depende de la tasa de cizalladura así como de la temperatura del polímero. Para describir la viscosidad del polímero se utiliza la ecuación de Carreau-Yasuda (6)

$$\mu = \frac{a_t * A}{(1 + (a_t * \gamma * B))^c} \quad (6)$$

Para describir el comportamiento de la variable a_t , se utiliza la aproximación de WLF (7)

$$\log a_t = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (7)$$

Y para el comportamiento de la rata de cizalladura se utiliza la aproximación de flujo en placas planas (8)

$$\gamma = \frac{6 * Q}{W * H^2} \quad (8)$$

Para poder solucionar la ecuación diferencial (5), se utiliza la metodología de diferencias finitas, en donde se discretiza el canal de flujo de polímero en pequeños deltas de longitud, que son evaluados en pequeños deltas de tiempo. Esto permite tener la solución de la presión necesaria para llenar la cavidad en función del tiempo, la temperatura, y la geometría.

Para describir el comportamiento de la temperatura durante el llenado, se parte de la ecuación general de Fourier para el transporte de calor por conducción (9)

$$-\nabla * (-\gamma * \nabla \vartheta) = \rho * C_p \frac{\nabla \vartheta}{\delta t} \quad (9)$$

Asumiendo lo siguiente:

- Flujo unidireccional
- Propiedades térmicas constantes

Se simplifica la ecuación a (10)

$$\frac{\nabla \vartheta}{\delta t} = \frac{\gamma}{\rho * C_p} * \frac{x^2 \vartheta}{\delta x^2} \quad (10)$$

Para solucionar este sistema de ecuaciones diferenciales, se vuelve a recurrir al método de las diferencias finitas. Se divide el espesor del canal de flujo en 20 capas, en donde la condición de frontera es la temperatura de la cavidad del molde (condición Dirichlet).

La solución del sistema entrega una distribución de temperatura en el canal en función del tiempo y las propiedades del material.

Para simplificar el problema no se toma en cuenta el flujo de calor en dirección del flujo o también llamado flujo convectivo de calor. Esta suposición genera que el enfriamiento en el canal, sea más rápido que en el modelo propuesto.

La ecuación (5) está en función de la viscosidad (6), que a su vez está en función de la temperatura del polímero. Es por esto que se acoplan las dos ecuaciones (10) y (5) en la solución del sistema.

Para simular el fenómeno de la solidificación de la pared durante el enfriamiento, se utiliza la temperatura de no flujo. [36]. Las capas más externas son las primeras que se van enfriando, cuando estén por debajo de la temperatura de no flujo, estas se solidifican, disminuyendo el espesor en el espesor. Esto genera un aumento en la presión necesaria para inyectar cuando los tiempos de inyección son altos o las velocidades son bajas.

5.5. Balance térmico en el molde durante el enfriamiento

Durante el enfriamiento del artículo, ocurre un intercambio de calor entre el artículo y el molde, el molde y el refrigerante y el molde con el ambiente, tal como se muestra en la Figura 4.

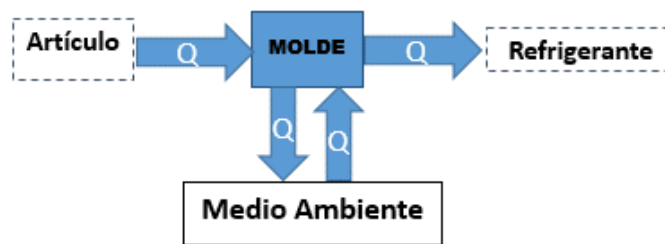


Figura 4 - Intercambio de calor en el molde

Se observa que puede existir un flujo bidireccional de calor entre el molde y el medio ambiente. La dirección del flujo depende de la temperatura ambiente y de la temperatura del refrigerante.

Para determinar la temperatura de la cavidad se realiza un balance térmico entre los componentes mediante el algoritmo mostrado en la Figura 5.

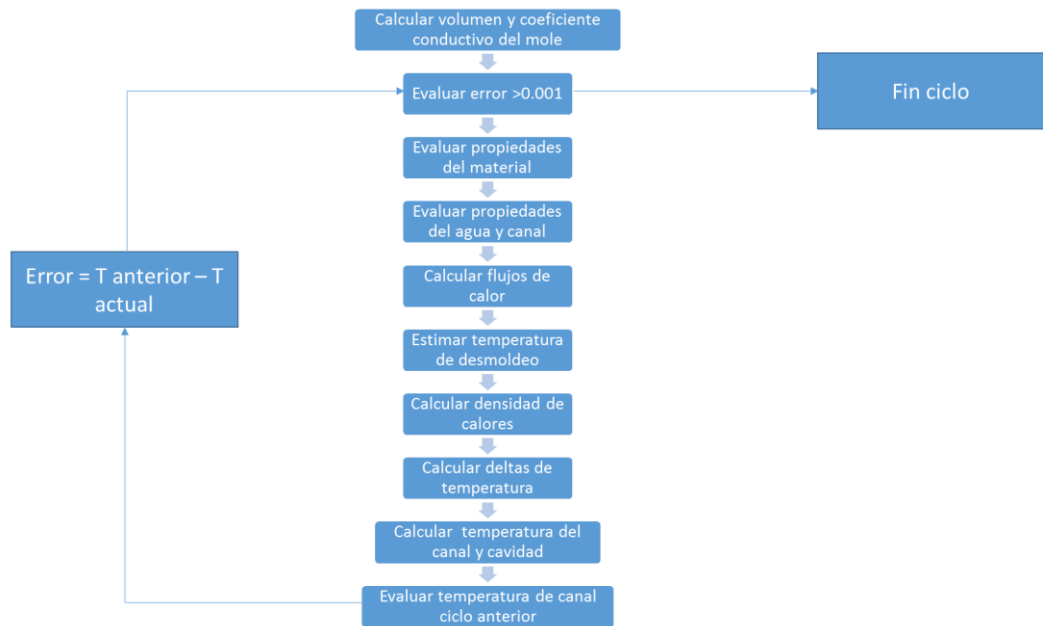


Figura 5 - Pseudo código balance de calor en molde

5.6. Fuerza de cierre

La presión generada durante el llenado, intenta abrir el molde por su línea de partición. Cuando la fuerza de cierre en la máquina es menor que la fuerza generada durante el llenado, se abre el molde y genera un defecto llamado rebaba, que consiste en un exceso de material que copia la línea de partición.

Para determinar la fuerza de cierre necesaria para mantener el molde cerrado se usa la ecuación (11)

$$F_{za} = \frac{1}{2} \frac{\text{Presion de inyección}}{\text{Area proyectada}} \quad (11)$$

Esta ecuación está dividida por un factor de 2, porque la presión se consume en el artículo siendo máxima en el punto de inyección, y 0 en donde termina el llenado, es por esto que se promedia la fuerza a la mitad.

6. DESCRIPCIÓN DE LA INYECTORA VIRTUAL

Este programa está dividido en diferentes módulos, que permiten evaluar diferentes aspectos en cada uno de ellos y un módulo final que cuenta con todas las características activas. La inyectora fue modelada para representar de la forma más cercana posible a una inyectora real. Todos sus componentes fueron modelados de manera independiente, lo que permite el movimiento relativo entre cada uno de los componentes.

Para el molde de inyección, se seleccionó un molde de probetas de tensión normalizado. Este molde se encuentra disponible en la universidad EAFIT, lo que permite a los estudiantes realizar una validación de resultados y una comparación de sus experiencias con la herramienta virtual y las prácticas de laboratorio. Las dimensiones de la probeta se dejan parametrizadas, lo que permite evaluar diferentes tipos de probetas.

La programación de los movimientos de los diferentes componentes tanto de la inyectora como del molde, se basa en una programación del movimiento de las primitivas geométricas, esto permite trabajos futuros en la herramienta como agregar más máquinas inyectoras o diferentes moldes con variadas geometrías.

6.1. Módulo de máquina.

Este módulo permite al estudiante tener un primer acercamiento con la máquina inyectora. Una inyectora no es un equipo que se encienda y se pueda trabajar de inmediato; sino, que se debe seguir un procedimiento de encendido para poder tener la máquina a punto y poder empezar a producir.

En este módulo se puede ejecutar este procedimiento de encendido y observar qué puede pasar si no se cumple alguno de los pasos. Algunos fenómenos como el calentamiento del aceite se aceleran pues son fenómenos que pueden tener duraciones desde 30 minutos hasta 1 hora.

Los componentes de la máquina que se pueden manipular son los siguientes:

- Unidad de cierre.
- Unidad de expulsión.
- Unidad de plastificación.

- Husillo o tornillo.

La máquina desarrollada en este trabajo es una inyectora hidráulica. Esta máquina utiliza un motor eléctrico para mover una bomba hidráulica. Esta bomba presuriza el sistema hidráulico y permite el movimiento de los diferentes componentes. El movimiento del fluido hidráulico a través del sistema, unido a la bomba más el motor, generan un calor considerable que puede generar daños en las válvulas de la máquina. Encender el motor sin encender la refrigeración, genera un recalentamiento del sistema hidráulico. Las máquinas inyectoras cuentan con un sistema de alarma que detiene cualquier movimiento de la máquina y alerta al operario de la anomalía presente. En este programa se simulan estas alarmas.

Otros factores que limitan el movimiento de la unidad de cierre, es la puerta de operación. Esta puerta permite al operario tener acceso al molde, pero cuando está abierta bloquea todo movimiento de la prensa para evitar aplastamientos accidentales.

El husillo o tornillo de inyección sólo se puede mover cuando se encuentra el motor encendido, el aceite se encuentra en su temperatura ideal, y adicional a esto, se debe esperar que la temperatura del polímero en el cilindro esté a una temperatura que garantice que el polímero se encuentre en su estado fundido. La máquina cuenta con protecciones que se activan si se intentara mover el tornillo con el polímero sólido, debido a que esto generaría un torque tal que rompería el elemento de seguridad de acople del tornillo, un daño que implica un paro significativo de la máquina.

En este módulo no se puede inyectar el polímero, solo se pueden observar todos los aspectos relevantes de la máquina. Tampoco se pueden parametrizar los parámetros del ciclo de inyección.

Los conceptos que se desarrollan en este módulo son:

- Máquina inyectora.
- Puerta de operador.
- Unidad de cierre.
- Unidad de plastificación.
- Husillo de inyección.
- Válvula antiretorno.
- Motor.

- Refrigeración del aceite.
- Calefacción del cilindro.
- Plastificación.

6.2. Módulo de carga.

El objetivo de este módulo es que el estudiante se familiarice con los conceptos necesarios para ajustar los parámetros relacionados con la carga del material.

El ajuste de un molde nuevo es un proceso que debe llevarse a cabo con precaución uno de los parámetros que debe ajustarse es cuánto material debe entrar al molde y en qué punto la inyectora va a conmutar su control de llenado volumétrico (control por velocidad) a llenado gravimétrico (control por presión). Este módulo permite al estudiante escoger entre una serie de probetas preseleccionadas, seleccionar el material, y luego ajustar los parámetros de carga mediante estimaciones matemáticas.

Una mala parametrización puede generar un defecto llamado “sobre inyección”, este se muestra visualmente como un exceso de material en el artículo, así como una alarma en la máquina anunciando que se ha llegado al límite de presión total de la máquina. Este es el tipo de ejercicios que se pueden hacer de manera indefinida en esta herramienta, hasta que el estudiante pueda entender el concepto claramente. Si este ejercicio se realizara en una máquina de verdad, se estaría arriesgando la integridad tanto de la máquina como del molde.

Un parámetro ajustable es el tiempo de la pospresión. Si este parámetro se ajusta en 0 segundos, le permite al estudiante realizar un estudio de llenados parciales. De esta manera, se anula el efecto de la pospresión y permite observar el llenado incompleto del artículo para determinar de forma experimental el punto de conmutación.

Una vez se determina el punto de conmutación, el estudiante puede experimentar con el tiempo de pospresión. El programa simula la solidificación a través del espesor del artículo, lo que permite observar la relación entre el tiempo de pospresión, y el peso del artículo. A medida que se aumenta el tiempo de pospresión, se inyectará más masa al artículo hasta que el punto de inyección se solidifique por completo. A partir de este momento no entrará más masa.

El programa no permite cambiar la presión en la pospresión, esta se ajusta dependiendo de la presión obtenida en la inyección en el llenado volumétrico. El usuario tampoco puede ajustar los parámetros de refrigeración, estos son ajustados automáticamente por la herramienta.

Los conceptos que se desarrollan en este módulo son:

- Longitud de plastificación.
- Llenado volumétrico.
- Llenado gravimétrico.
- Punto de conmutación.
- Tiempo de pospresión.
- Llenado incompleto.
- Sobre inyección.
- Conmutación tardía y temprana.
- Densidad en estado sólido.
- Densidad en estado fundido.

6.3. Módulo de enfriamiento.

El objetivo de este módulo es que el estudiante se familiarice con los conceptos del enfriamiento en el proceso de inyección. Para poder inyectar un polímero, se debe elevar su temperatura hasta el punto que tenga la fluidez suficiente para poder ser inyectado al molde. Una vez se llena por completo la cavidad, se debe enfriar el polímero hasta el punto en el cual tenga la rigidez suficiente para ser expulsada del molde sin que sufra deformaciones. Este fenómeno es crítico porque depende de su correcto ajuste para obtener un proceso productivo y sin defectos.

Durante el enfriamiento de la pieza ocurre un intercambio de calor entre el artículo y el molde. La pieza que está a una temperatura mayor que la cavidad del molde, transfiere su calor elevando la temperatura de la cavidad, por esto el molde debe contar con un sistema de refrigeración que le permita de manera eficiente retirar el calor del artículo y enfriarlo lo más rápido posible.

Se podría decir que la mejor manera de aumentar la productividad del proceso de inyección es usar moldes con temperatura bajas para aumentar la velocidad de enfriamiento, pero esto no es posible porque la temperatura de molde afecta la apariencia superficial del artículo y en el caso de algunos materiales este rápido

enfriamiento afecta el proceso de cristalización, alterando sus propiedades mecánicas.

Este módulo permite predecir la temperatura de expulsión de la pieza, para que el estudiante pueda aprender a estimar los tiempos de enfriamiento y ver qué efectos tiene expulsar un artículo a temperaturas elevadas. Este módulo no predice los defectos de apariencia debidos a la temperatura del molde, ni tampoco el efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la cristalización del material.

Adicionalmente, este módulo permite que el estudiante observe como la temperatura de la cavidad difiere de la temperatura del refrigerante. Generalmente se tiene la creencia de que la temperatura que se configura en el refrigerante del molde será la misma en la cavidad del artículo, pero en realidad esta última es mayor y depende de varios factores como la temperatura de la masa inyectada, el diseño de la refrigeración del molde, el flujo del refrigerante, el tiempo de ciclo y el material del molde.

Conceptos que se desarrollarán en este módulo:

- Tiempo de enfriamiento.
- Temperatura de refrigerante.
- Temperatura de cavidad.
- Caudal de refrigerante.
- Temperatura de masa.
- Temperatura de expulsión.
- Difusividad térmica.
- Degradación térmica.

6.4. Módulo de avanzado.

El objetivo de este módulo es consolidar todos los módulos anteriores, para su ejecución el estudiante debe partir de la selección del material, para luego escoger la geometría que desee. A partir de esta información se deben calcular todos los parámetros y observar la calidad de la pieza obtenida.

Este módulo relaciona todas las variables involucradas en el llenado y enfriamiento y le permite al estudiante analizar y entender como las variables o parámetros de entrada afectan la calidad del artículo final. Adicionalmente, se pueden observar fenómenos como el llenado del molde, la plastificación y los defectos que se pueden obtener si no se ajustan bien los parámetros.

Los defectos que puede simular esta herramienta son los siguientes:

- Sobre inyección (rebaba).
- Rebaba por fuerza de cierre insuficiente.
- Vetas por mala plastificación.
- Vetas por material degradado.
- Deformación por alta temperatura de expulsión.
- Rechufe por tiempo de pospresión insuficiente.

Una de las ventanas de control de la inyectora virtual, muestra al estudiante el tiempo de ciclo dividido en cada uno de sus diferentes sub procesos; de esta manera se pueden estudiar como las variables impactan el tiempo de ciclo.

Los conceptos que se desarrollan en este módulo son:

- Parámetros de carga.
- Parámetros de enfriamiento.
- Tiempos de ciclo.
- Presiones de inyección.
- Vigilancias en el proceso.

7. ANALISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultado se compara los resultados obtenidos con la herramienta virtual, y los resultados obtenidos en la inyectora de la universidad EAFIT. En la Tabla 1 se observan las variables que son comparadas en ambos casos.

Tabla 1 - Variables a medir

Variable a medir	Unidades	Medición
Plastificación total	mm	Visual en control
Punto de conmutación	mm	Visual en control
Cojín másico	mm	Visual en control
Presión en llenado	Bar	Visual en manómetro de presión
Temperatura de molde	°C	Termómetro de contacto
Temperatura de expulsión	°C	Termómetro láser
Masa	g	Balanza digital
Tiempo de pospresión para sellado del punto de inyección	s	Visual en control

La Tabla 2 contiene las especificaciones de la inyectora usada. Para realizar un experimento comparable, se configura en el simulador un tamaño de tornillo similar (32 mm).

Tabla 2 - Especificaciones de la inyectora

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Diámetro del husillo	32 mm
Capacidad de carga o de inyección (PS)	115 g / 4,0 oz
Volumen de inyección máximo	128 cc
Relación L/D del husillo	20
Presión máxima de inyección	1777 bar
Unidad de cierre	Tipo rodillera
Fuerza de cierre máxima	75 ton
Carrera del husillo	160 mm
Flujo másico (PS)	65 g/s
Altura mínima del molde	100 mm
Altura máxima del molde	360 mm
Espacio entre columnas	320 x 320 mm
Dimensiones de la inyectora	3,8 x 1,05 x 1,5 m
Presión hidráulica	140 bar
Apertura máxima del molde	630 mm
Tipo de accionamiento	Híbrida

El molde seleccionado para trabajar, es un molde que pertenece a la universidad EAFIT que se observa en la Figura 6. Este molde forma una probeta para realizar ensayos a tensión. El molde tiene como características 2 placas y 4 circuitos de refrigeración. El material usado es un Polietileno de alta densidad DOW Polifen 640 de Ecopetrol suministrado por la universidad EAFIT. Este material fue caracterizado para obtener su curva reológica y obtener los parámetros del modelo de Carreau para poder ingresarlos al simulador. Las características térmicas del material del molde y del Polietileno, se utilizan valores genéricos para dichos materiales.



Figura 6 - Molde de probetas

Para obtener los resultados en el simulador, se utiliza el módulo avanzado y se usa la información geométrica de la probeta mencionada. Para la configuración de los parámetros de carga se parte de la ecuación (12) para calcular la longitud de carga total. La conmutación se calcula a partir de la ecuación (13). El tiempo de enfriamiento se fue aumentando gradualmente hasta que se encuentra una temperatura de expulsión de 70°C. El tiempo de pospresión se aumenta gradualmente hasta que el peso no presenta variación alguna. Debido a que el simulador tiene en cuenta el comportamiento transiente de la temperatura del molde se deja 20 ciclos en automático para garantizar que la temperatura de molde se estabilice y poder tomar cada uno de los valores mencionados.

$$carga = \frac{4 * masa}{\pi * D^2 * \delta_{fundido}} + 10\%D \quad (12)$$

$$conmutacion = \left(\frac{4 * masa}{\pi * D^2 * \delta_{fundido}} + 10\%D \right) - \left(\frac{4 * masa}{\pi * D^2 * \delta_{solido}} \right) \quad (13)$$

Para comparar los resultados del simulador, el valor de la carga obtenido se configura igual. A partir de este punto se empieza a realizar un llenado parcial empezando con un punto de conmutación cercano al 70% de la carga, y se empieza a disminuir hasta llegar al 95% del llenado de la pieza. En este punto se asume como el punto de conmutación ideal. El tiempo ideal de pospresión se establece mediante una gráfica de peso VS tiempo de pospresión, y se selecciona el tiempo en donde no se observa un aumento de peso. Para el tiempo de enfriamiento se usa el mismo que se obtuvo en el simulador, con el fin de validar los resultados. Los resultados compilados se pueden observar en la Tabla 3. La medición de cada una de las variables se realiza como se especificó en la Tabla 1

Tabla 3 - Comparación de resultados

Variable a medir	Unidades	Valor en simulador	Valor experimental	Error relativo
Plastificación total	mm	47	47	0%
Punto de conmutación	mm	12	12	0%
Cojín másico	mm	3	4.2	29%
Presión en llenado (velocidad constante a 40mm/s)	bar	370	450	18%
Temperatura de molde	°C	40	45	11%
Temperatura de expulsión	°C	70	78	10%
Masa	g	15.2	15.9	4%
Tiempo de pospresión para sellado del punto de inyección	s	8	7	14%

Adicional a los resultados presentados, se realiza una comparación de la presión de inyección en función de la velocidad de inyección Figura 7, y la variación de la masa del artículo en función del tiempo de pospresión Figura 8.

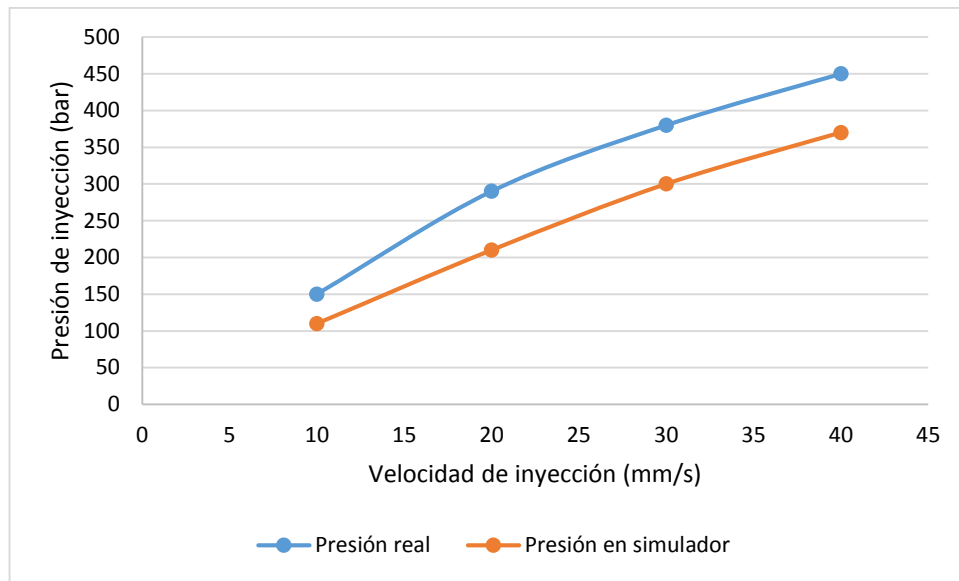


Figura 7 - Presión de inyección y velocidad de inyección

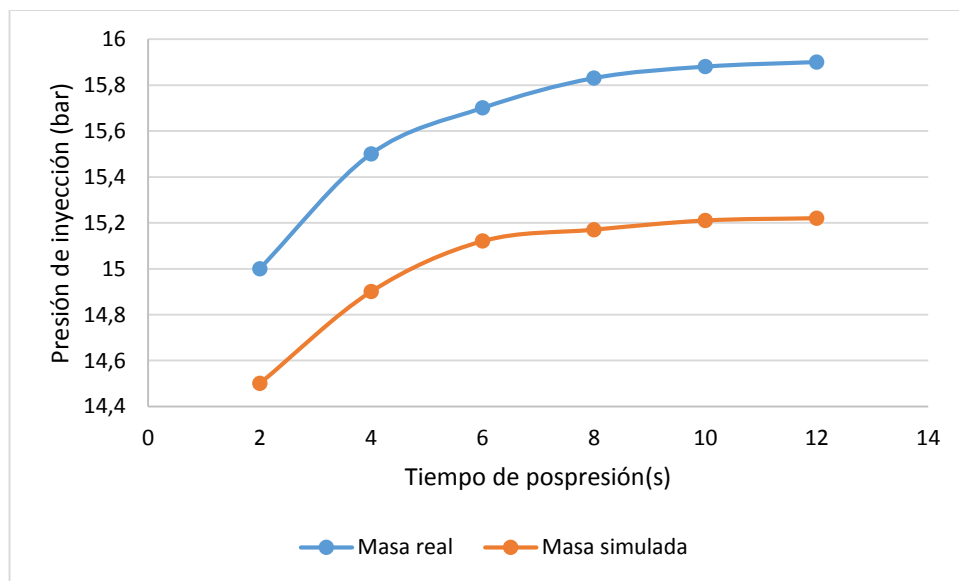


Figura 8 - Masa vs tiempo de pospresión

8. CONCLUSIONES

- Como parte de la metodología propuesta, se establecen 8 módulos que le permiten al estudiante adquirir conocimientos de inyección hasta un nivel suficiente para parametrizar de forma adecuada una máquina inyectora real sin poner en riesgo la integridad de la máquina y buscando siempre tener un producto conforme. La metodología desarrollada en este proyecto no requiere que el estudiante tenga un conocimiento previo del proceso de inyección.
- Como soporte para la metodología de aprendizaje propuesta, se desarrolló una inyectora virtual que se asemeja a una inyectora real. Para tener una interacción más realista se modelan fenómenos de transporte como flujo del material polimérico a través del molde y la transferencia de calor en el artículo. Estos modelos permiten estimar las variables más importantes del proceso, así como los defectos más comunes.
- La inyectora virtual desarrollada está dividida en 4 módulos que permiten analizar diferentes fenómenos del proceso de inyección. A medida que se navega por ellos, va aumentando el grado de dificultad, hasta llegar al módulo avanzado, el cual reúne todas las actividades de los módulos anteriores y acopla todas las ecuaciones de fenómenos de transporte permitiendo una simulación aproximada a la realidad.
- El uso de la herramienta en aulas de clase permite una mejor comprensión de los diferentes temas, porque el estudiante puede interactuar con la herramienta y trabajar en los temas que no entiende o quiere tener mayor profundidad. En el semestre 2015-1, 9 estudiantes de la materia inyección de polímeros de la universidad EAFIT, probaron la herramienta y concuerdan que es un complemento fundamental porque los videos e imágenes solo muestran información muy básica y esta herramienta les permitió entender los conceptos que no quedan claros. Los estudiantes confirman que la parte visual del programa atrae mucho la atención y ayuda al estudiante a concentrarse en el tema.
- La herramienta tiene la ventaja que está basado en modelos matemáticos simplificados que pueden ser ejecutados en tiempo real, simulando el funcionamiento de la inyectora. Un simulador comercial puede dar resultados

más precisos pero tiene tiempos de cálculo mayores a 4 horas y requiere de costosos equipos de cómputo. Esta simplificación tiene como desventaja que genera desviaciones en algunos parámetros cuando se valida experimentalmente. Los parámetros de carga tienen un error para la plastificación del 0% y para el cojín másico del 29%. En la predicción de la presión de la herramienta, se obtiene una desviación del 18% frente a los datos experimentales, y finalmente, en la predicción de la masa esperada del artículo se obtiene un error del 4% frente a los datos obtenidos experimentalmente. El error en el cálculo del cojín másico y en la presión se debe a la simplificación realizada en el modelo matemático del flujo del polímero a través de los canales del molde.

- Los modelos matemáticos y los objetos 3D fueron creados de manera paramétrica, esto le confiere flexibilidad al programa y permite cambiar los objetos geométricos como la inyectora o el molde en caso que se necesite implementarlos. Las geometrías 3D deben tener un proceso de optimización de malla para evitar el consumo excesivo de recursos de memoria. La herramienta está configurada y habilitada para integrarse a las actualizaciones del motor gráfico. Esta se puede actualizar en conjunto, lo que evita la obsolescencia con el tiempo, además de permitir nuevas características como mayor fidelidad visual o mejor rendimiento en las diferentes plataformas.

9. TRABAJOS FUTUROS

- Implementar modelo de Tait o similar para la predicción de las contracciones dependiendo de los parámetros configurados.
- Implementar en el cálculo de llenado, la disipación viscosa y el flujo convectivo de calor para mejorar la precisión del cálculo.
- Cambiar el modelo de llenado por un modelo basado en elementos finitos en vez de diferencias finitas, que pueda simular efectos bidimensionales y mejorara la precisión del cálculo. Adicional que mejora la flexibilidad de artículos que se puedan simular con el simulador.
- Implementación de diferentes máquinas inyectoras con diferentes características
- Implementación de diferentes moldes con varios niveles de complejidad como canal de alimentación caliente, moldes de 3 placas con jaladores, sistemas de desenrosque, expulsión de varias etapas, entre otros.
- Desarrollar una herramienta virtual similar para el proceso de extrusión.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Mann, «Process parameter control: The key to optimization,» *Plastic engineering*, vol. 30, pp. 25-27, 1974.
- [2] L. Ning-yun, G. Gui-xia, Y. Yi y L. Jian-hua, «Multi-objective process parameter optimization for energy saving in Injection molding process,» *Journal of Zhejiang University*, 2012.
- [3] T. E. b. I. U. Hasan Oktem, «Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part,» *Materials and Design*, pp. 1271-1278, 2007.
- [4] A. Kamoun, M. Jaziri y M. Chaabouni, «The use of the simplex method and its derivatives to the on-line optimization of the parameters of an injection moulding process,» *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, pp. 117-122, 2009.
- [5] G. Choi, K. Lee y N. Chiang, «Optimization of process parameters of injection molding with neuronal network application in a process simulation environment,» *Ann. CIRP*, vol. 1, pp. 449-452, 1994.
- [6] P. Yarlagadda y C. Ang Teck Khong, «Development of a hybrid neural network system for prediction of process parameters in injection moulding,» *Journal of Material Processing Technology*, pp. 110-116, 2001.
- [7] M. Kamal, R. Mashelkar y A. Mujumdar, «Transport phenomena in polymer systems,» *Wiley, New York*, pp. 133-217, 1989.
- [8] C. Hieber y S. Shen, «A finite-element/finite-difference simulation of the injection molding filling process,» *Journal of Non Newtonian Fluid Mech.*, vol. 7, pp. 1-32, 1980.
- [9] J. Hetu, D. Gao, A. Garcia y G. Salloum, «3D Finite element method for the simulation of the filling stage in injection molding,» *Polymer Engineering Science*, vol. 2, pp. 223-236, 1998.
- [10] D. Cowan, «CAE centre—a way of linking university to industry,» *Computer-Aided Design*, vol. 17, nº 8, pp. 379-383, 1985.
- [11] R. Doyle y K. Case, «CAE software in manufacturing engineering education,» *Computers & Education*, vol. 15, nº 1-3, pp. 277-288, 1990.
- [12] O. Oiling, «CAE/CAD/CAM PERSPECTIVE AT CHRYSLER CORPORATION,» *Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing*, pp. 897,908, 1992.

- [13] G. Bertacchi, «Computer technology for injection moulding: Myth or reality?,» *Materials & Design*, vol. 7, nº 5, pp. 232-236, 1986.
- [14] AUTODESK, «Simulation MOLDFLOW,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.autodesk.com/products/simulation-moldflow/overview>. [Último acceso: 2014].
- [15] Moldex3d, «Moldex3d Virtual molding simulation,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.moldex3d.com/en/>. [Último acceso: 2014].
- [16] SIGMA Engineering GmbH, «SIGMASOFT molding simulation,» SIGMA Engineering GmbH, 2014. [En línea]. Available: http://www.sigmasoft.de/ftp/web/home_us/index.php. [Último acceso: 2014].
- [17] P. Häfner, V. Häfner y J. Ovtcharova, «Teaching Methodology for Virtual Reality Practical Course in Engineering Education,» *Procedia Computer Science*, vol. 25, pp. 251,260, 2013.
- [18] N. Avis, P. ILogan y D. Wills, «The use of virtual environments to assist the teaching of knee arthroscopy procedures,» *Royal Society conference on VR in Society*, 1995.
- [19] K. McKenna, K. McMenemy, R. Ferguson, A. Dick y P. S, «Enhancing the immersive reality of virtual simulators for easily accessible laparoscopic surgical training,» *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering*, vol. 6804, 2008.
- [20] United States Congress, Office of Technology Assessment, «Virtual reality and technologies for combat simulation,» *US Government Printing Office*, Vols. %1 de %2Washington,, 1994.
- [21] R. Loftin, M. Engelberg y B. R, «Applying virtual reality in education: a prototypical virtual physics laboratory,» *Proceedings of*, pp. 67-74, 1993.
- [22] J. Li, Y. Yao y W. J, «CNC partner: a novel training system for NC machining,» *Computer Applied Engineering*, vol. 19, pp. 466-474, 2011.
- [23] Y. Yao, J. Li y L. C, «A virtual machining based training system for numerically controlled machining,» *Computer Applied Engineering*, vol. 15, pp. 64-72, 2007.
- [24] Tooling U-SME, «Tooling U-SME Training,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.toolingu.com/dept-500-materials-training.html>. [Último acceso: 2 2015].
- [25] Routsis Training, «Routsis Training Programs,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.traininteractive.com/training/online/injection/>. [Último acceso: 2 2015].
- [26] Polymer training and innovation centre, «PICAT II,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.picat.co.uk/>. [Último acceso: 2014].

- [27] Paulson Training, «SIMTECH SIMULATOR,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.paulsontraining.com/paulson-products/injection-molding/simtech/>. [Último acceso: 2014].
- [28] G. Grimm, G. Holzinger y S. Moser, «Flight Simulator for injection Molding Machines,» *Kunststoffe*, vol. 4, pp. 39-44, 2011.
- [29] S. Shu-Huang y T. Li-Zhan, «Development of virtual training platform of injection molding,» *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 63, pp. 609-620, 2012.
- [30] B. MA, Z.-y. GUO y H.-m. ZHOU, «Development of a plastic injection molding training system,» *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, vol. 7, nº 3, pp. 302-308, 2006.
- [31] M. M. MARIA LUISA, M. JUAN DE JUANES, R. V. MARIA y P. G. JESUS MARIA, «SIMULANDO LA INYECCIÓN DE PLÁSTICOS. NUEVAS FORMAS DE APRENDER LOS PROCESOS,» *Dyna, Ingeniería e industria*, vol. 87, pp. 671-678, 2012.
- [32] Y. Liu, «Effect Research of Simulation Modeling of Virtual Injection Molding Machine System,» *Huazhong University of Science and Technology*, 2011.
- [33] CRYTECH, «Cryengine,» 2014. [En línea]. Available: www.cryengine.com. [Último acceso: 2014].
- [34] UNREAL, «Unreal Engine,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.unrealengine.com/what-is-unreal-engine-4>. [Último acceso: 2014].
- [35] UNITY, «Unity game engine,» 2014. [En línea]. Available: <http://unity3d.com/es>. [Último acceso: 2014].
- [36] G. A. Mannella, V. La Carrubba, V. Brucato, W. Zoetelief y G. Haagh, «No-Flow Temperature in Injection Molding Simulation,» *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 119, pp. 3382 - 3392, 2010.

11. ANEXOS

11.1. Descripción general de la herramienta:

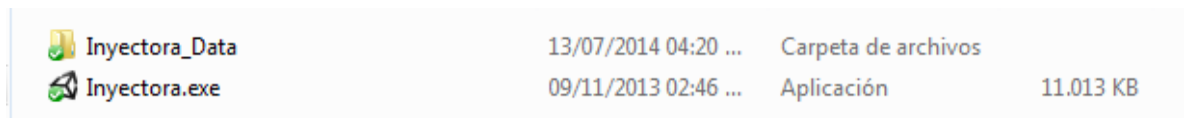
Este programa fue desarrollado sobre un motor gráfico de libre acceso llamado Unity 3D [35]. Con este motor gráfico se pueden tomar modelos CAD y darles características interactivas, igual que un videojuego.

Para la correcta ejecución de la inyectora virtual se recomienda un computador con las siguientes especificaciones:

- Intel o AMD de doble núcleo con una velocidad mínima de 2.0 GHZ
- 2GB de RAM
- Sistema operativo Windows 7 o superior
- Tarjeta de video dedicada con 512Mbs de video.
- Resolución mínima 1280X720

Este programa funciona en computadores de escritorio como en equipos portátiles desde que se cumpla con las especificaciones sugeridas, no funciona en computadores Apple o en tabletas móviles.

Para ejecutar el programa se debe hacer doble click sobre el icono mostrado en la Figura 9. Al abrir el programa, el usuario encuentra una pantalla en donde se puede seleccionar sobre cual módulo puede trabajar (Figura 10), o cerrar el programa.



Inyectora_Data	13/07/2014 04:20 ...	Carpeta de archivos	
Inyectora.exe	09/11/2013 02:46 ...	Aplicación	11.013 KB

Figura 9 – Archivo ejecutable

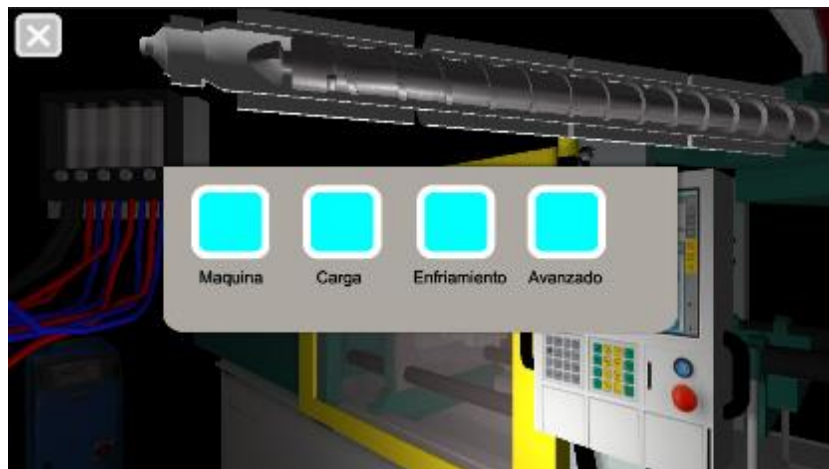


Figura 10 – Pantalla de inicio

Los módulos disponibles son los siguientes:

- **Módulo de máquina:** Permite al usuario conocer la máquina inyectora, observar sus movimientos y limitaciones, y ver una breve descripción de sus componentes.
- **Módulo de seguridades y vigilancias:** Permite al estudiante entender el concepto sobre la función de la máquina para proteger el molde contra daños.
- **Módulo de carga:** Le permite al estudiante entender los conceptos sobre la parametrización de la carga de material y la conmutación.
- **Módulo de temperatura y refrigeración:** Le permite al estudiante entender el concepto sobre las temperaturas del proceso y la correcta parametrización de la refrigeración del proceso.
- **Módulo avanzado:** En este módulo el estudiante puede seleccionar las características de un artículo y el material, y debe realizar la correcta parametrización del proceso. Además, el programa retroalimenta al estudiante sobre los resultados obtenidos.

11.2. Módulos de la herramienta:

11.2.1. Módulo de máquina:

La pantalla principal se divide en los siguientes componentes mostrados en la Figura 11:

1. Cierre de aplicación: Cierra este módulo
2. Registro de errores: Aquí se registra el error presentado en la máquina.

3. Vista de husillo: Activa la vista del de la unidad de plastificación, un segundo click activa la vista del husillo y un tercer click retorna a la vista de la máquina.
4. Cámara: Activa las diferentes cámaras o vistas de la inyectora para ver mejor los componentes de la misma.

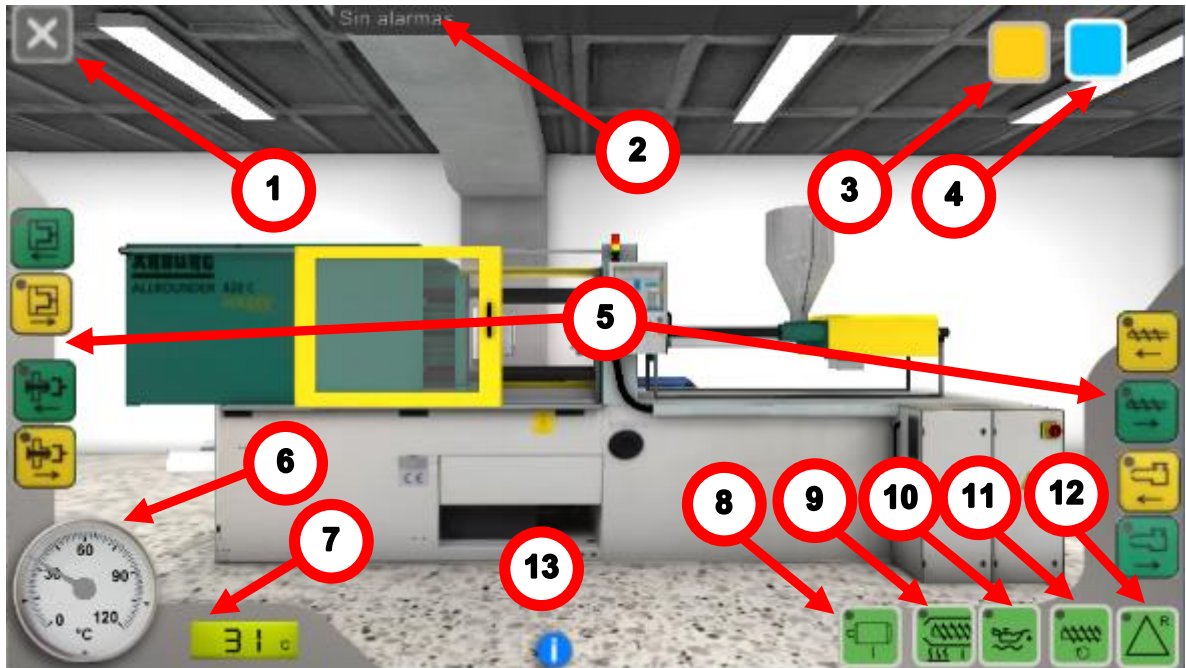


Figura 11 – Pantalla principal del módulo máquinas

5. Grupo de botones de máquina: Botones que mueven o activan los componentes de la máquina.
 - a. Abrir molde.
 - b. Cerrar molde.
 - c. Retroceder expulsión.
 - d. Avanzar expulsión.
 - e. Avanzar husillo (inyectar).
 - f. Retroceder husillo (descompresión).
 - g. Unidad de plastificación adelante.
 - h. Unidad de plastificación atrás.
6. Temperatura del aceite: Muestra esquemáticamente la temperatura del aceite hidráulico.
7. Temperatura de masa: muestra un promedio de la temperatura de la masa al final del tornillo.
8. Encender motor: Enciende el motor de la máquina.
9. Encender calefacción: enciende la calefacción de la unidad de plastificación.

10. Encender refrigeración del aceite: enciende el sistema de refrigeración del sistema hidráulico de la máquina.
11. Plastificar: Activa la rotación del husillo para cargar material.
12. Reset: Resetea los errores que se hayan generado.
13. Modo descripción: Activa el modo descripción donde se pueden observar una breve descripción de los diferentes elementos de la máquina.

Ejemplo:

El primer paso es encender la refrigeración del sistema hidráulico de la máquina. Si se cambia la vista o cámara, se puede observar en el sistema de distribución de la máquina (Figura 12) como fluye el agua. Con esto encendido se puede proceder a encender el motor. Se puede observar como la temperatura del aceite se eleva hasta llegar a una temperatura de trabajo. Mientras la temperatura llega a su nivel óptimo, no se pueden mover los componentes de la máquina, el movimiento generaría una alarma en la máquina.



Figura 12 – Distribuidor de aguas

Luego se debe proceder a encender el sistema de calefacción de la máquina. Se puede observar como la temperatura de la masa se eleva y no se pueden realizar movimientos del tornillo porque se genera un error en la máquina. En la Figura 13 se observa el mecanismo de alarma de la máquina, un sistema visual que alerta que algo no está bien.

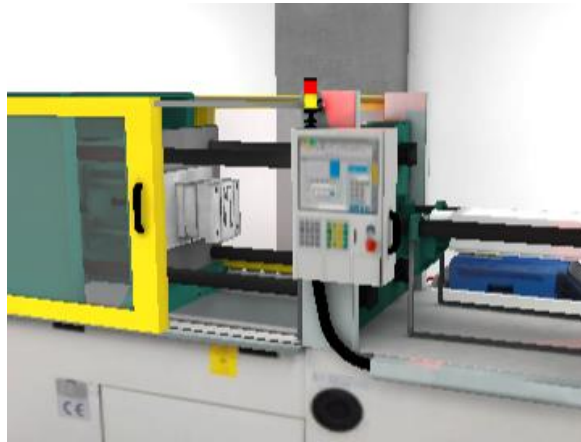


Figura 13 – Alarma de la máquina

Una vez se estabilicen las temperaturas se puede proceder a intentar mover algún elemento de la máquina, si la puerta del operador se encuentra abierta no se podrá mover ningún elemento. Para cerrar la puerta del operador se puede hacer click sobre ella (Figura 14).



Figura 14 – Puerta del operador

Limitaciones a tener en cuenta:

- No se puede mover los elementos si se encuentra el motor apagado.
- No se puede mover ningún elemento si la puerta del operador se encuentra abierta.
- No se puede mover ningún elemento si la temperatura del aceite no ha llegado a la temperatura ideal (50°C).
- Si no se enciende la refrigeración del aceite, ocasionara un recalentamiento del aceite y no se podrá mover ningún elemento.
- Si no se enciende la resistencia del sistema de plastificación, no se podrá mover el husillo.

- Si la unidad de cierre no se encuentra abierta en su máxima posición, no se podrá avanzar la unidad de expulsión.

11.2.2. Módulo de carga:

La pantalla principal se divide en los siguientes componentes Figura 15:

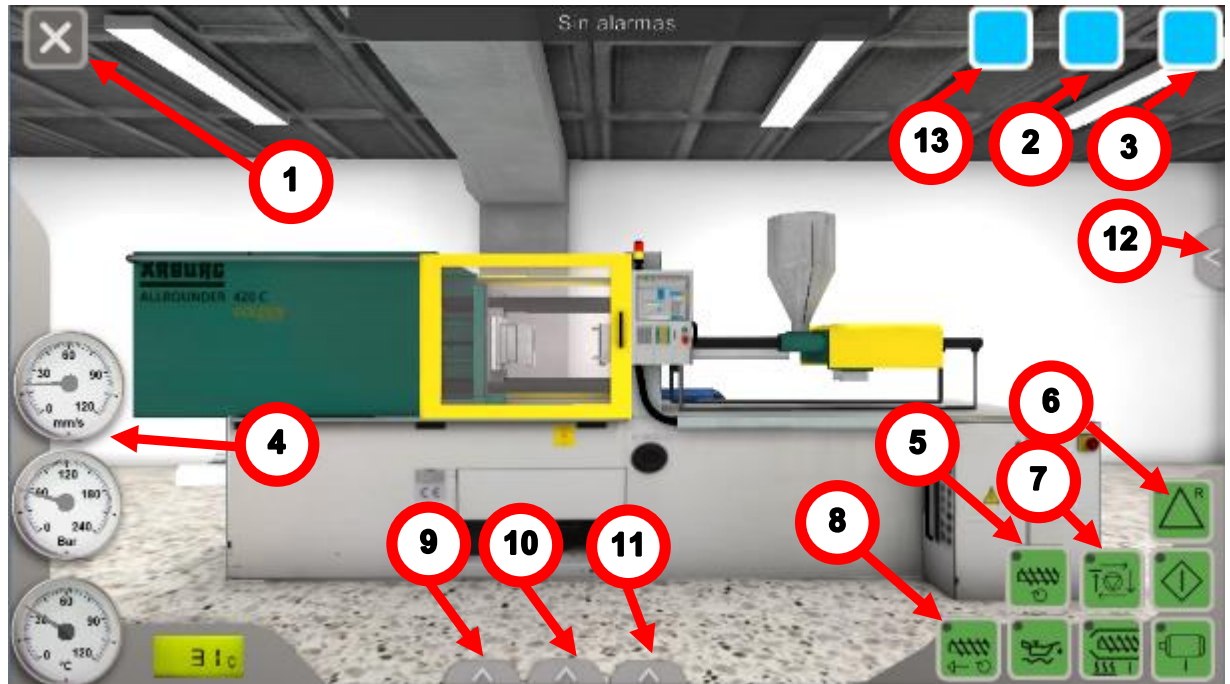


Figura 15 – Pantalla principal módulo de máquina

1. Cierre de aplicación: Cierra este módulo
2. Vista detalle: Activa la vista de la unidad de plastificación, y la vista del molde.
3. Cámara: Activa las diferentes cámaras o vistas de la inyectora para ver mejor los componentes de la misma
4. Grupo de diales de variables de respuesta:
 - a. Velocidad de inyección: muestra la velocidad a la cual se desplaza el husillo de inyección
 - b. Presión de inyección: Muestra la presión específica en el husillo de inyección
5. Plastificar: Activa la rotación del husillo para cargar material
6. Reset: Resetea los errores que se hayan generado
7. Semi automatico: activa el modo automático o semi-automático de la máquina
8. Auto purga: Activa el sistema de auto purga de la máquina, el objetivo de esta función, es repetir tres veces el ciclo de carga,

9. Cuadro de parámetros 1: En este cuadro de parámetros se debe seleccionar el tipo de material el cual se debe inyectar.
10. Cuadro de parámetros 2: En este cuadro se debe seleccionar la geometría a cual se desea inyectar. La geometría corresponde a una probeta para tensión. Se deben seleccionar las medidas. Adicional, se debe seleccionar el tornillo de la inyectora.
11. Cuadro de parámetros: En este cuadro se debe seleccionar los parámetros de carga.
12. Cuadro de posiciones: En este cuadro se puede observar la posición actual del husillo así como el cojín másico final.
13. Cuadro de resultados: Este cuadro muestra una evaluación del artículo que se acaba de inyectar. En forma de texto expresa si los parámetros fueron correctamente parametrizados, y visualmente da una representación de la pieza inyectada.

Ejemplo.

Al abrir este módulo, se observa que los paneles están desactivados. Se debe primero abrir el panel del material Figura 15 y seleccionar le tipo de material. Para este caso se seleccionara PC (Policarbonato). Luego de seleccionar el material, se cierra el cuadro y se abre el siguiente cuadro de geometría, donde se selecciona el tipo de probeta con el que se desea trabajar (Tipo A, B, C). El programa estimará un volumen estimado de la probeta (Figura 16)

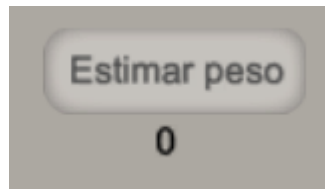


Figura 16 – Estimación del peso

A continuación, se procede a cerrar el cuadro de geometría y abrir el siguiente cuadro de parámetros, en donde se encuentran los parámetros carga y conmutación. Se ponen los valores mostrados a continuación (Figura 17).

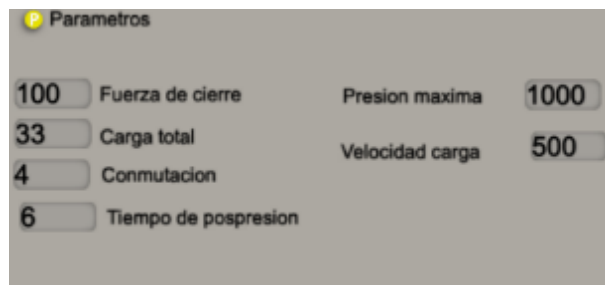


Figura 17 – Parámetros de carga

Se cierra el cuadro y se presiona la tecla de arranque para dar inicio al proceso. Como se observa en el panel de resultados (Figura 18) se obtuvo una sobreinyección, debido a que el punto de conmutación fue mal calculado, para poder continuar, se debe resetear la alarma y se vuelve a abrir el cuadro de parámetros y se parametriza así (Figura 19).

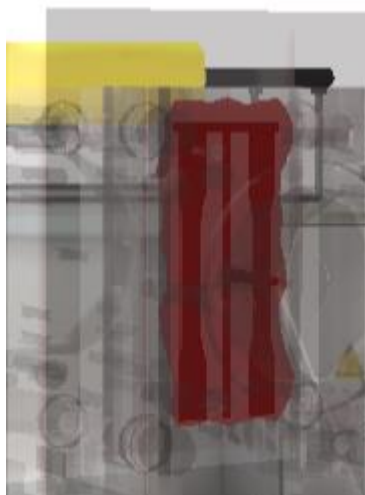


Figura 18 - Sobreinyección

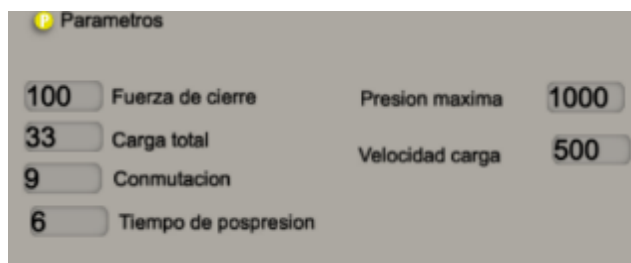


Figura 19 – Parámetros de carga corregidos

Con esta nueva parametrización, se abre el cuadro de resultados y se observa que la pieza tiene un llenado correcto.

En caso que se desee hacer un llenado parcial y observar el patrón de llenado del artículo, se debe ajustar el tiempo de pospresión en 0 segundos, esto genera que la pospresión no sea efectiva. Siguiendo con el mismo ejemplo anterior se parametriza de la siguiente manera (Figura 20).

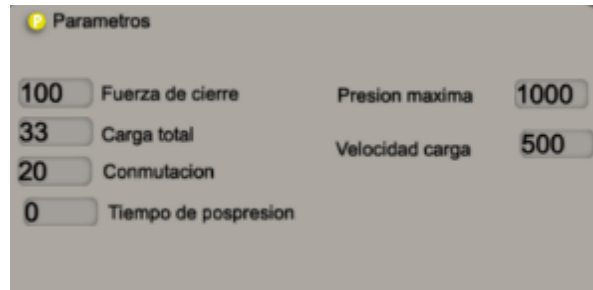


Figura 20 – Simulación del llenado incompleto

Se reinicia el proceso y se observa que la pieza no tiene un llenado correcto. De esta manera se puede determinar cuál es el punto óptimo de conmutación.

Si se desea realizar un llenado gravimétrico, se debe primero ajustar el punto de conmutación, luego se debe realizar diferentes inyecciones, cambiando el tiempo de pospresión y evaluando como cambia el peso del artículo, esta información se puede observar en el cuadro de resultados. Una vez el peso no suba más, se tiene el tiempo óptimo de pospresión.

11.2.3. Módulo de temperatura y refrigeración

La pantalla principal se divide en los siguientes componentes Figura 21.

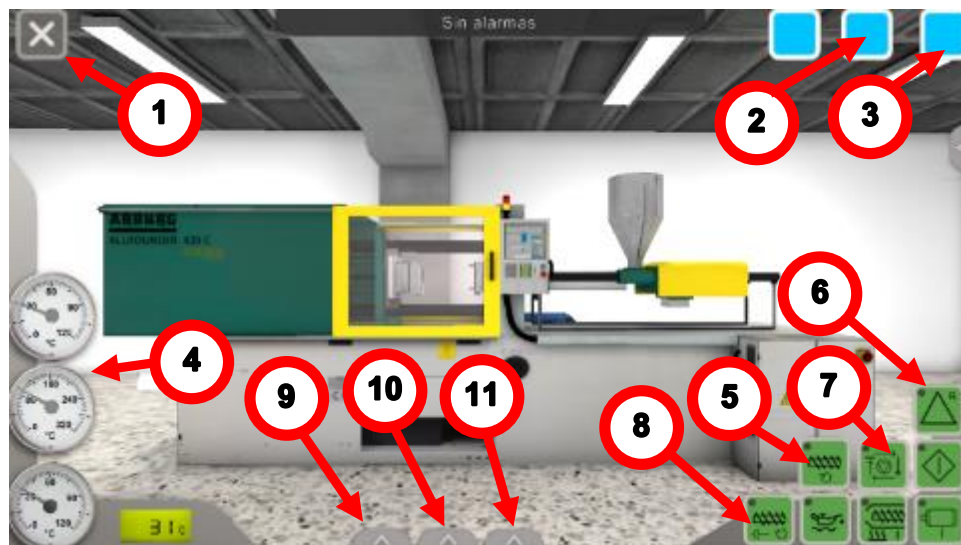


Figura 21 – Pantalla principal del módulo de refrigeración

1. Cierre de aplicación: Cierra este módulo.
2. Vista detalle: Activa la vista del de la unidad de plastificación y la vista del molde.
3. Cámara: Activa las diferentes cámaras o vistas de la inyectora para ver mejor los componentes de la misma.
4. Grupo de diales de variables de respuesta:
 - a. Temperatura de cavidad: muestra la temperatura promedio estimada de la cavidad.
 - b. Temperatura del artículo: muestra la temperatura actual del artículo para determinar la temperatura de expulsión.
5. Plastificar: Activa la rotación del husillo para cargar material.
6. Reset: Resetea los errores que se hayan generado.
7. Semi automatico: activa el modo automático o semi-automático de la máquina.
8. Auto purga: Activa el sistema de auto purga de la máquina, el cual se encarga de cargar 3 veces y eliminar material del cilindro, para evacuar el material.
9. Cuadro de parámetros 1: En este cuadro de parámetros se debe seleccionar el tipo de material el cual se debe inyectar y el espesor del artículo a inyectar
10. Cuadro de parámetros: En este cuadro se debe seleccionar los parámetros de refrigeración
11. Cuadro de resultados: Este cuadro muestra una evaluación del artículo que se acaba de inyectar. En forma de texto expresa si los parámetros fueron correctamente parametrizados, y visualmente da una representación del artículo.

Ejemplo.

Al abrir este módulo, se observa que los paneles están desactivados. Se debe primero abrir el panel del material (Figura 22) y seleccionar el tipo de material. Para este caso se seleccionará PEAD (Polietileno de alta densidad) y se seleccionará un artículo con un espesor de 2.5 mm..

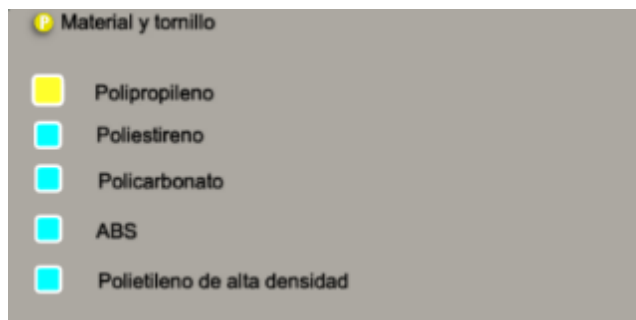


Figura 22 – Selección del material

Se debe cerrar este cuadro y abrir el siguiente cuadro de parametrización. En este cuadro se ajustan variables como la temperatura del agua y el flujo o caudal de refrigerante que entra en el molde, el tiempo de enfriamiento del artículo y la temperatura de masa del material. Se ajusta como se observa en la Figura 23.

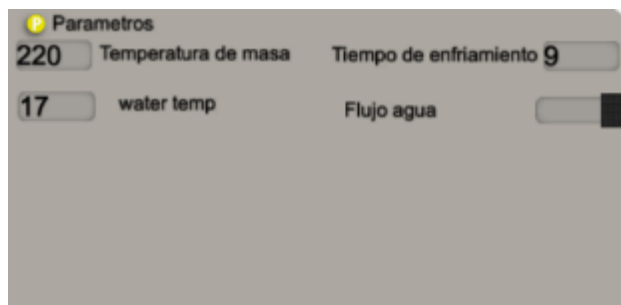


Figura 23 – Parámetros de enfriamiento

Se cierra el cuadro y se arranca el proceso. Se observa en el cuadro de resultados, que la probeta presenta una deformación (Figura 24) causada por la alta temperatura de desmoldeo que supera a la temperatura máxima recomendada para el material usado. Se abre el cuadro de parámetros y se aumenta el tiempo de enfriamiento como muestra la Figura 25. se cierra el cuadro y se vuelve a correr el ciclo. Ahora se observa que la probeta no presenta deformación.

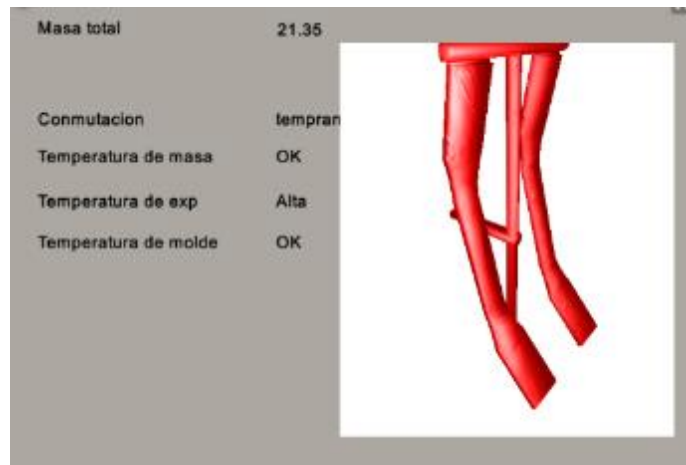


Figura 24 – Visor de defectos

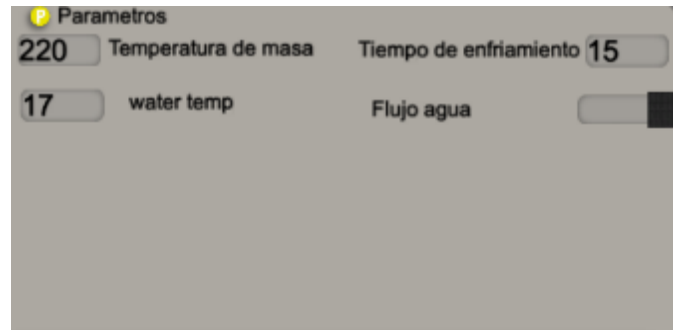


Figura 25 – Parámetros de refrigeración corregidos

Si se observan los diales (Figura 26), se puede observar como la temperatura de la cavidad no es constante, esto se debe a la transferencia de calor entre el molde y artículo, y luego entre el molde y el refrigerante. También se observa (Figura 26) como la temperatura del artículo disminuye a medida que enfría, acercándose a un valor cercano a la temperatura de la cavidad. Es de notar que la temperatura del refrigerante no es igual a la temperatura de la cavidad.



Figura 26 – Diales de temperatura

11.2.4. Módulo avanzado:

La pantalla principal se divide en los siguientes componentes Figura 27.

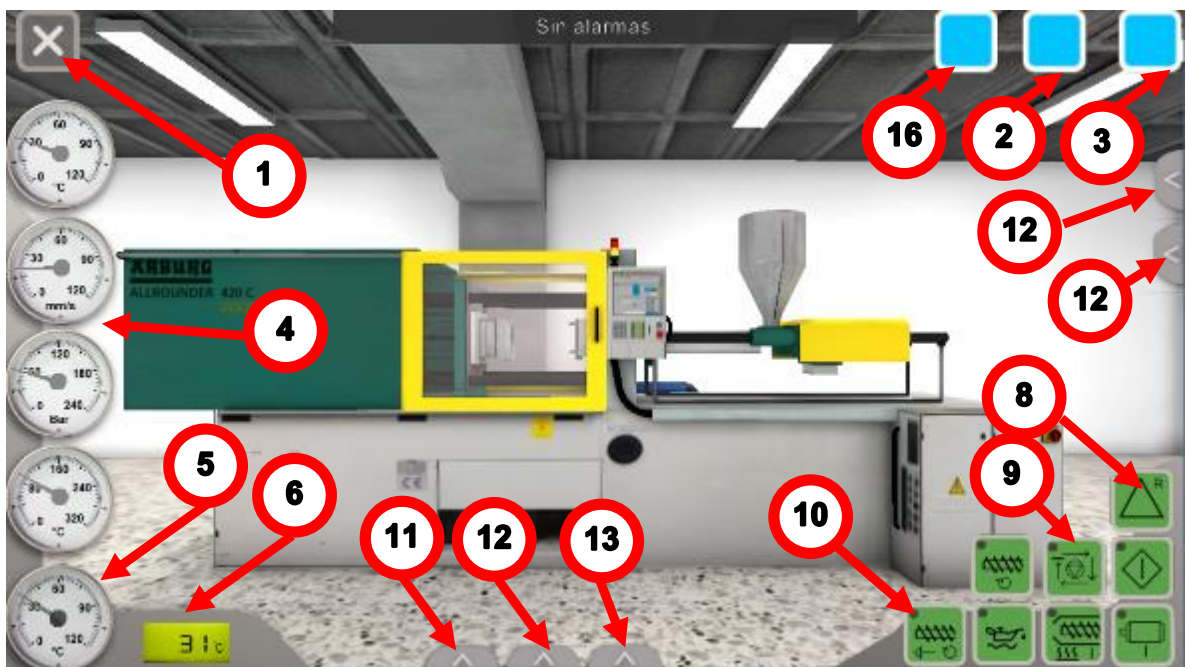


Figura 27 – Pantalla principal módulo de temperatura

1. Cierre de aplicación: Cierra este módulo.

2. Vista detalle: Activa la vista del de la unidad de plastificación, y la vista del molde.
3. Cámara: Activa las diferentes cámaras o vistas de la inyectora para ver mejor los componentes de la misma.
4. Grupo de diales de variables de respuesta:
 - a. Temperatura de cavidad: muestra la temperatura promedio estimada de la cavidad.
 - b. Velocidad de inyección: muestra la velocidad a la cual se desplaza el husillo de inyección.
 - c. Presión de inyección: Muestra la presión específica en el husillo de inyección.
 - d. Temperatura del artículo: muestra la temperatura actual del artículo para determinar la temperatura de expulsión.
5. Temperatura del aceite: Muestra esquemáticamente la temperatura del aceite hidráulico.
6. Temperatura de masa: muestra un promedio de la temperatura de la masa al final del tornillo.
7. Plastificar: Activa la rotación del husillo para cargar material.
8. Reset: Resetea los errores que se hayan generado.
9. Semi automatico: activa el modo automático o semi-automático de la máquina.
10. Auto purga: Activa el sistema de auto purga de la máquina, el cual se encarga de cargar 3 veces y eliminar material del cilindro, para evacuar el material.
11. Cuadro de parámetros 1: En este cuadro de parámetros se debe seleccionar el tipo de material el cual se debe inyectar.
12. Cuadro de parámetros 2: En este cuadro se debe seleccionar la geometría a cual se desea inyectar. La geometría corresponde a una probeta para tensión. Se deben seleccionar las medidas. Adicional, se debe seleccionar el tornillo de la inyectora.
13. Cuadro de parámetros: En este cuadro se debe seleccionar los parámetros de inyección. No se pueden dejar espacios vacíos, todos se deben llenar.
14. Cuadro de tiempos: En este cuadro se observan en tiempo real, el tiempo que toma cada uno de los procesos del ciclo de inyección.
15. Cuadro de posiciones: En este cuadro se puede observar la posición actual del husillo así como el cojín másico final.
16. Cuadro de resultados: Este cuadro muestra una evaluación del artículo que se acaba de inyectar. En forma de texto expresa si los parámetros fueron correctamente parametrizados, y visualmente da una representación del artículo.

Ejemplo.

Al abrir el módulo, se observa que no están activados ninguno de los controles de máquina. Es necesario parametrizar todos los elementos para poder activar los controles. El primer paso es abrir el panel de selección de material Figura 28. Para este caso simularemos una probeta en polipropileno. Luego de seleccionar la probeta se procede a cerrar el cuadro de dialogo.

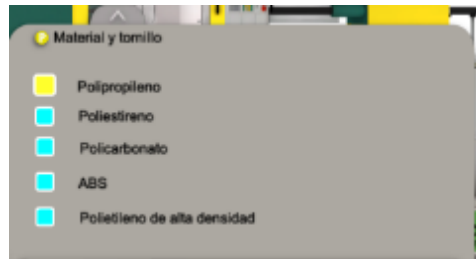


Figura 28 – Selección de materiales

Ahora se procede a abrir el cuadro de selección de geometría. Se selecciona una probeta como se muestra en la Figura 29 y se selecciona un tornillo de 35mm, en este cuadro se puede estimar cual sería el peso de dicha probeta. Se debe cerrar el cuadro para poder continuar.



Figura 29 – Parámetros de la geometría

Luego se procede a abrir el cuadro de parametrización. Si se desea hacer un llenado parcial y observar como llena la pieza para determinar el correcto punto de conmutación, entonces se debe poner en 0 el tiempo de pospresión, esto generará que no se aplique presión posterior y no haya conmutación. Se ponen los valores escritos a continuación Figura 30. Y se cierra el cuadro de parámetros.

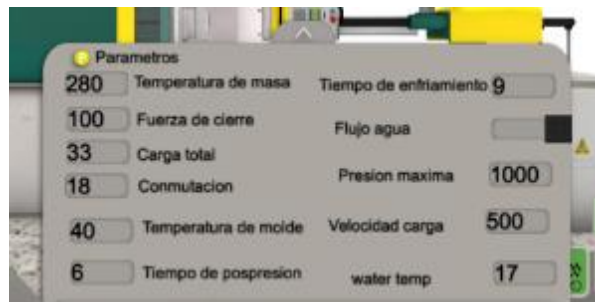


Figura 30 – Parámetros del ciclo

Ya con la máquina parametrizada, se debe realizar el procedimiento de encendido de la máquina, primero se debe encender la refrigeración del aceite. Cambiando la cámara se puede observar que el agua este fluyendo por los circuitos, ahora se puede encender el motor y las resistencias del cilindro. En los paneles laterales se puede observar el calentamiento de ambos ítems y se debe esperar a que se estabilicen, si se intenta arrancar la máquina antes de tiempo se activará una alarma.

Cuando estén estables las temperaturas, se debe activar el sistema de autopurga para que se cargue el material en el cilindro de plastificación, con el botón de detalle se puede observar cómo se carga el material Figura 31. Cuando se termine de cargar se puede dar arranque al proceso, en la vista principal se puede observar como la máquina comienza su ciclo de inyección y en la vista de detalle, como el polímero fluye a través del molde. Una vez termina el ciclo, si está activado el ciclo automático, se volverá a comenzar, si está en semiautomático, se detendrá la máquina a la espera de nuevas órdenes.

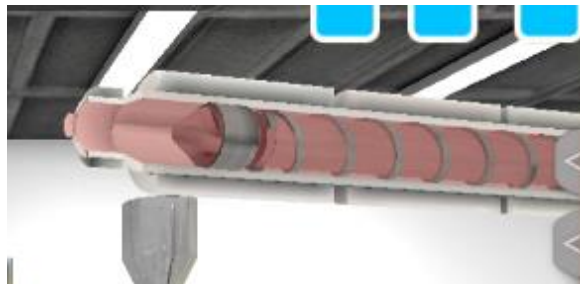


Figura 31 – Husillo de inyección

Cuando el ciclo termina, se puede abrir los paneles de tiempo, acá se observará el detalle de los tiempos de ciclo, también se puede observar el panel de posiciones y revisar que el cojín másico concuerde con el valor estimado Figura 32.

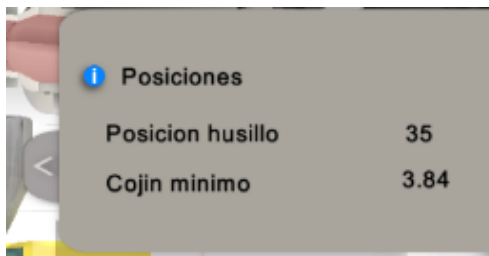


Figura 32 – Posición del husillo

Si se abre el panel de resultados, se observa visualmente que la pieza presenta una deformación no deseada, además que se reportan varias fallas en la parametrización Figura 33. Se observa que la temperatura de expulsión está muy alta, se debe modificar el tiempo de refrigeración. Adicional se observa que la temperatura de masa está muy alta, se debe cambiar y por último se reporta que el punto de conmutación está muy temprano. Para corregir este fenómeno, se vuelve a abrir el cuadro de parámetros y se recalculan los parámetros.



Figura 33 – Visor e defectos

Una vez se hayan corregido los parámetros, se vuelve a ejecutar el ciclo de inyección y el panel de resultados ya reporta una correcta inyección Figura 34.

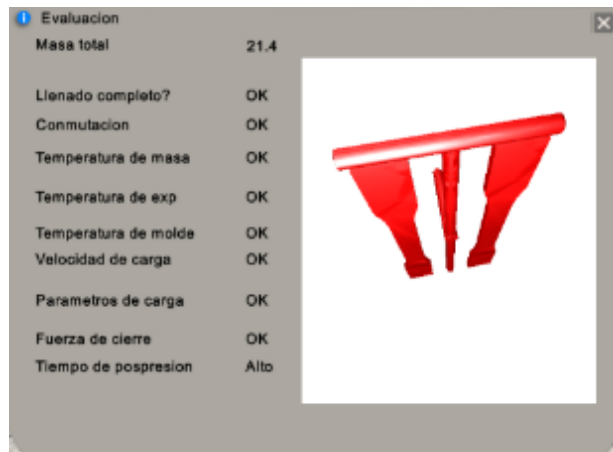


Figura 34 – Artículo sin defectos

11.3. Procedimiento para implementar una nueva inyectora:

El primer paso para implementar una nueva inyectora en la herramienta de simulación, es realizar la modelación 3D de la inyectora deseada (Figura 35). Para la modelación, se recomienda limitar el número de polígonos a 1 millón. Un número superior a este puede consumir recursos importantes y hacer lenta la simulación.

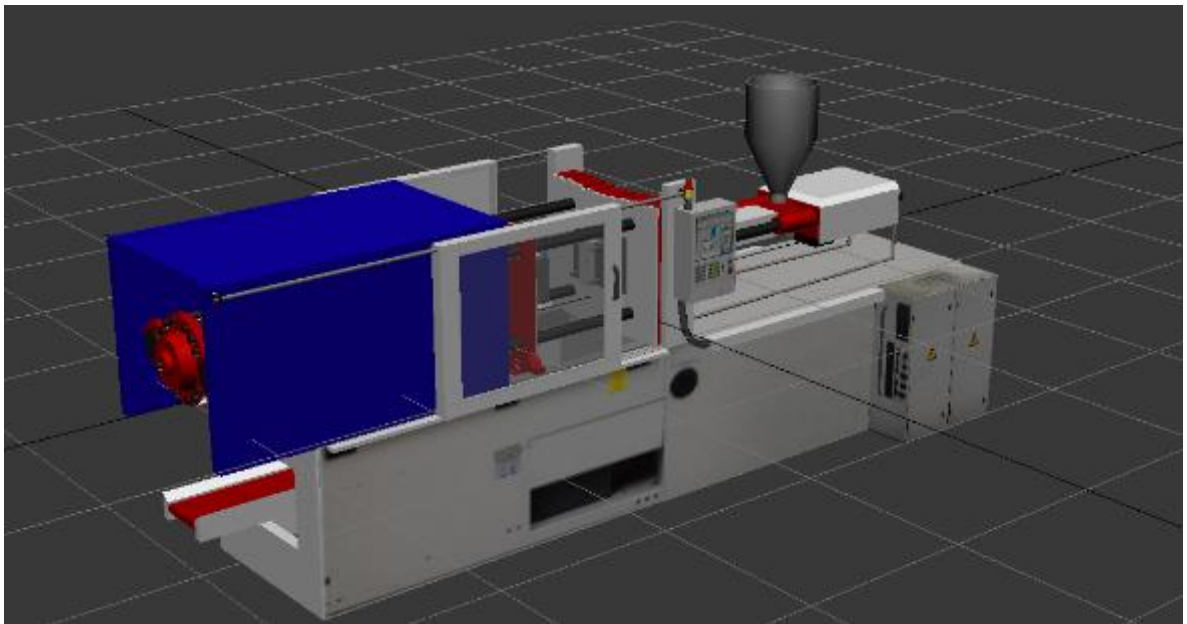


Figura 35 - Geometría 3d de la inyectora

Los programas ideales para modelar la inyectora son los modeladores artísticos como 3DstudioMax®, Blender®, Maya®, Modo®, entre otros. No se recomienda

usar modeladores paramétricos, pues estos no generan mayas optimizadas como se muestra en la (Figura 36), un tornillo generado en Solidworks® y otro generado en Blender®.

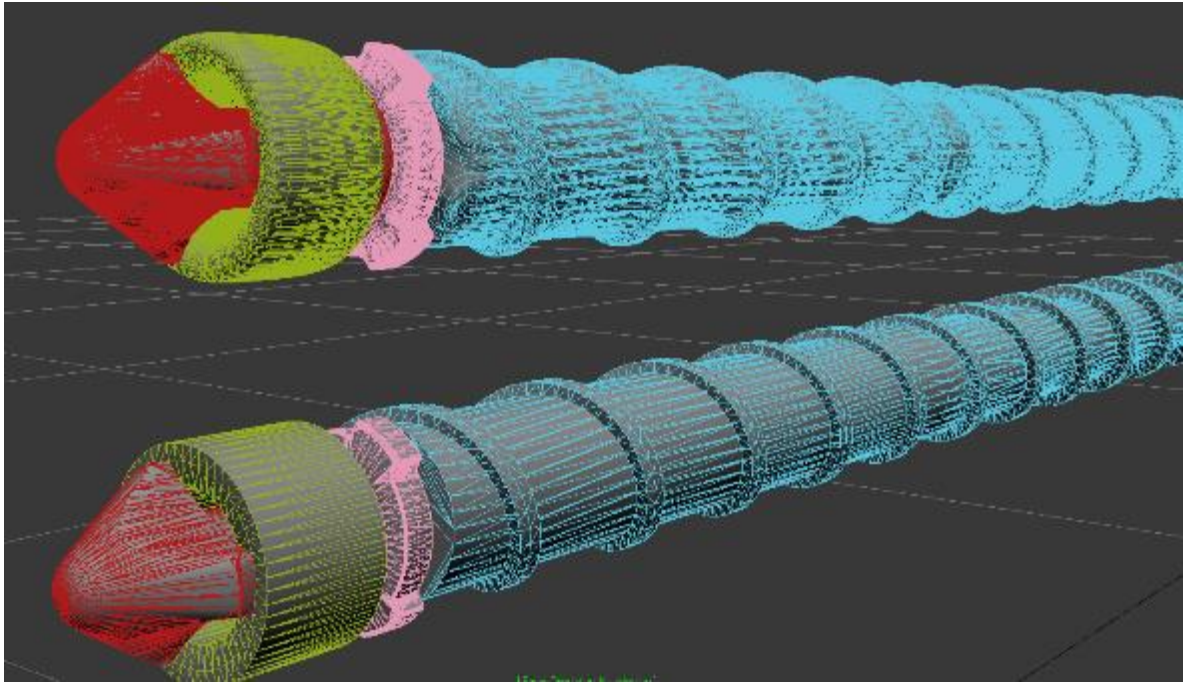


Figura 36 - (Arriba) Tornillo Solidworks. (Abajo) Tornillo Blender

La inyectora debe estar modelada en componentes independientes para poder generar el movimiento relativo entre los mismos. Si se desea que la inyectora tenga un efecto foto realista, se deben generar las respectivas texturas y los mapas UV dentro del modelador, y se debe exportar la geometría en el formato FBX.

Una vez esté generada la geometría, Se debe abrir el proyecto o código fuente e importar la geometría que está actualmente en FBX. Esto superpondrá la inyectora sobre la escena (Figura 37)

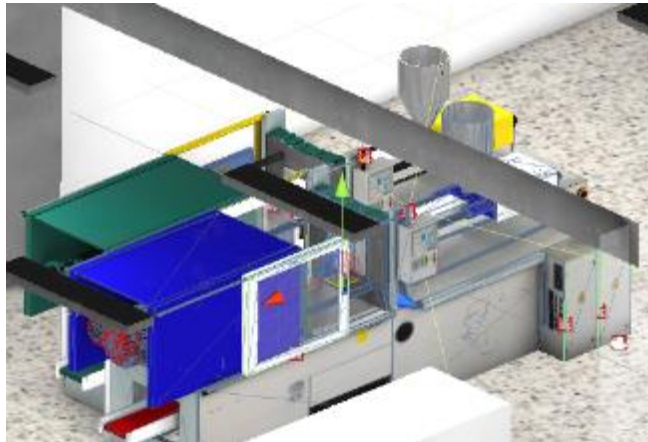


Figura 37 - Ambas inyectoras posicionadas en escena

Mediante los diales de posición (Figura 37) se posiciona la inyectora para que quede en la posición deseada. No es importante la posición final de la inyectora, pues los movimientos están programados con movimientos relativos a su posición original. Cuando esté posicionada se procede a buscar en la inyectora original, las máquinas de estados finitos de cada componente en movimiento (Figura 38). Cada máquina de estado finito debe ser copiada y pegada en el respectivo componente y de esta manera quede programado y parametrizado el componente. Es muy importante que la inyectora este organizado en la jerarquía siguiente:

- Inyectora (Objeto vacío)
 - Unidad de plastificación
 - Husillo
 - Unidad de cierre
 - Molde
 - Unidad de expulsión
 - Sistema de expulsión de molde
 - Puerta de operación
 - Componentes del chasis

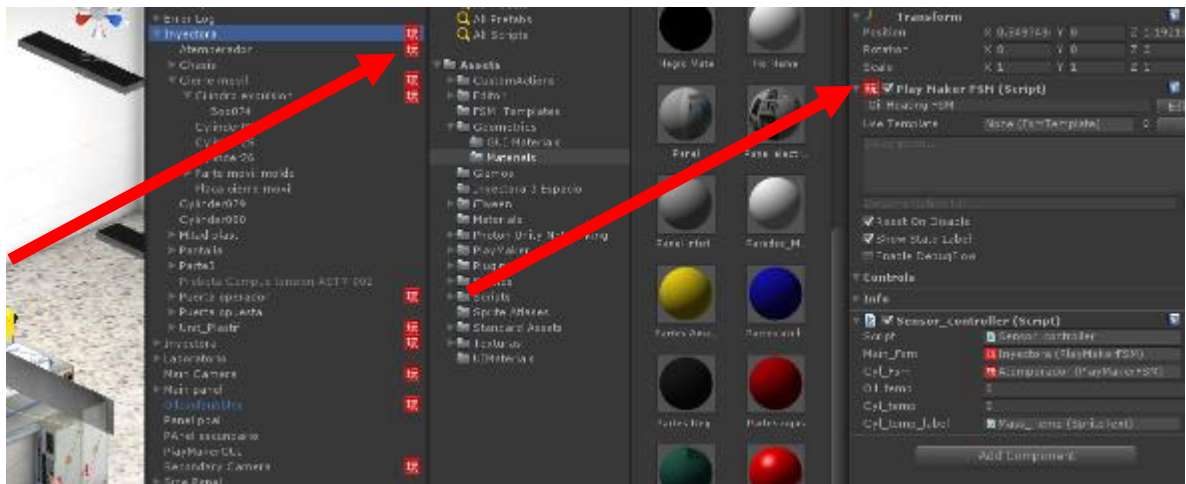


Figura 38 - Máquinas de estados finitos

Los componentes que requieren máquinas de estados finitos son las siguientes:

- Husillo de inyección
- Carro o unidad de plastificación
- Unidad de cierre
- Cilindro de expulsión
- Puerta del operador

Cuando ya se tiene copiado las máquinas de estado finito, se debe abrir las máquinas de estado finito de cada componente y abrir el estado inicial (Figura 39). En este estado inicial se deben configurar las posiciones iniciales y finales de cada recorrido. Este desplazamiento se debe hacer de forma manual y visual.

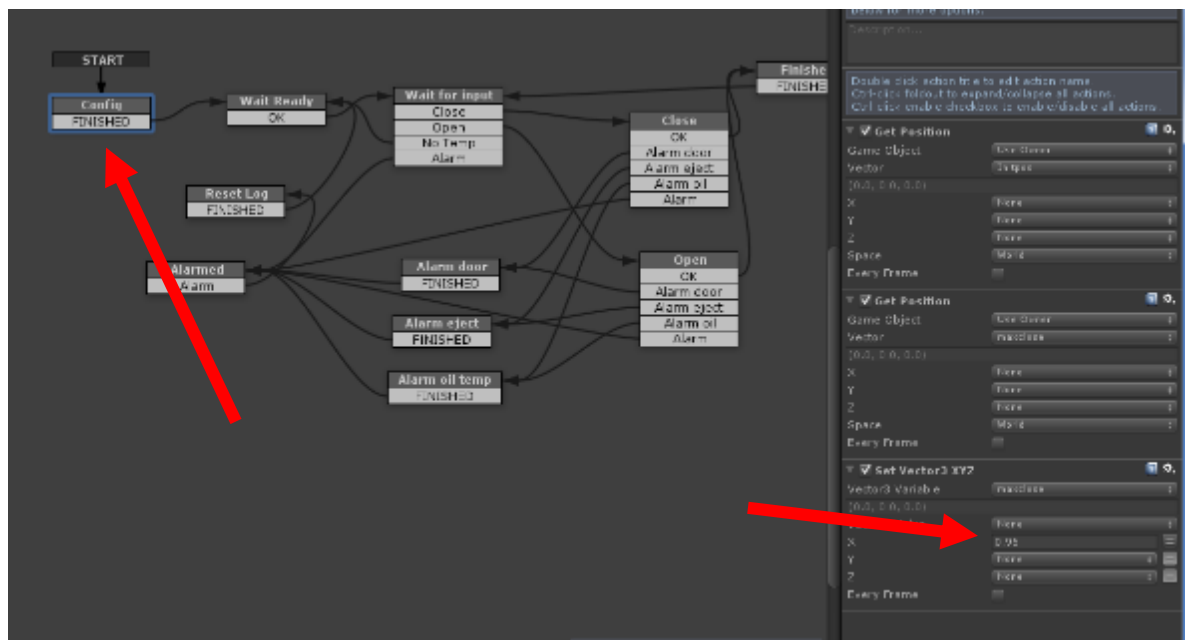


Figura 39 - Configuración de máquinas de estado finito

Adicional a las máquinas de estado finito, se debe anexar el código de los sensores, y el código matemático a la inyectora, El código de los sensores se encuentra ubicado en scripts, y se llama Sensor_Controller.js. Este componente se debe agregar al padre o geometría principal como se muestra en la Figura 40

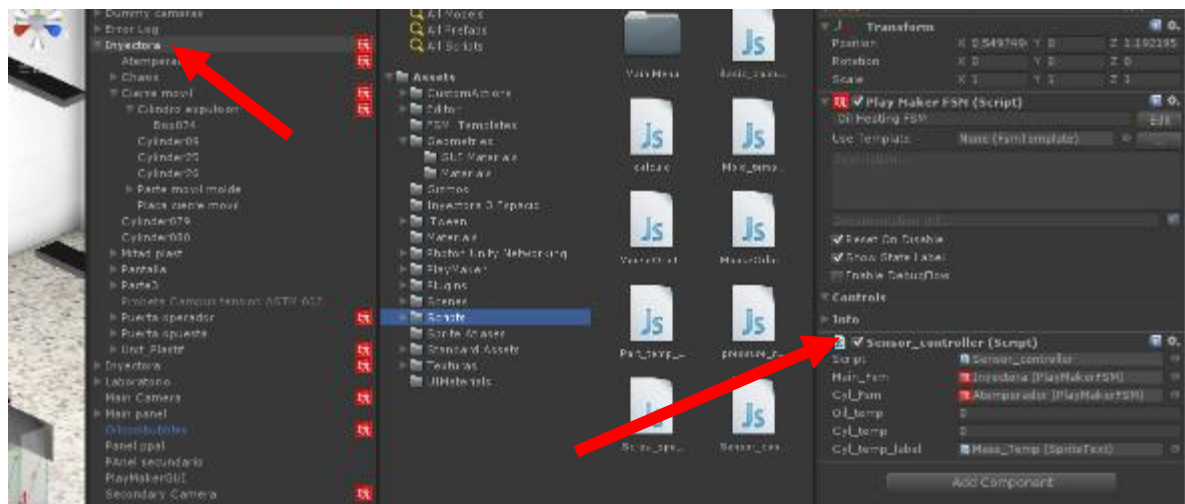


Figura 40 - Ubicación del código matemático

El modelo matemático se debe agregar en la geometría del tornillo. Cuando ya se tienen los componentes de programación anexados se debe proceder a eliminar la inyectora original y así dejar en la escena solo la inyectora deseada (Figura 41).

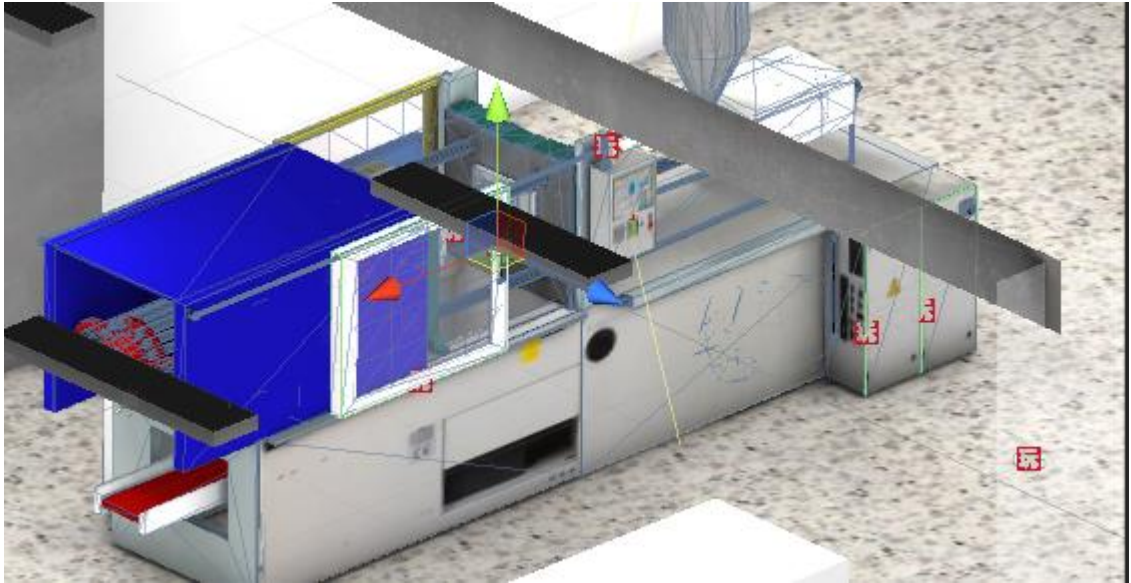


Figura 41 - Resultado final

En caso que se desee usar una inyectora con brazo de cierre mecánico con rodillera doble, se debe primero generar un enlace mecánico de unión cilíndrica entre los componentes del brazo, y luego se procede, de la misma manera mencionada en este anexo.